

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECAÁNICA**



**MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELECTROMECAÁNICA**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**“PRESENTADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER SCIENTIARUM”**

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CONFORMADO  
EN LAS PROPIEDADES DE LA FIBRA DE TEREFALATO DE  
POLIETILENO RECICLADO (RPET) DURANTE EL PROCESO DE  
HILADO CENTRÍFUGO FUNDIDO”.**

**Autor: Ing. Pablo Andres Gumiel Rivera**

**Tutor: Ph.D. Ing. Marco Antonio Ruiz Gutiérrez**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

**DEDICATORIA:**

*A mi madre, María Eugenia Rivera Laffertt, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en mi educación académica y en mi formación integral como persona. Por su incondicional apoyo y amor perfectamente mantenido a través del tiempo.*

*A mi hermana Laura, por estar conmigo y apoyarme siempre, por ser mi guía y compañera incondicional.*

*A mi abuela María Isabel, que desde el cielo me guía en mis decisiones.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellas, al cuidado de San Expedito y a la bendición de Dios.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*La presente tesis es un esfuerzo en el cual participaron, directa o indirectamente, varias personas, opinando, corrigiendo, dándome ánimo y acompañándome en los momentos de crisis y de felicidad.*

*Agradezco a mi tutor, Ph.D. Ing. Marco Antonio Ruiz Gutiérrez, por su paciencia, valiosa dirección y apoyo.*

*A mis estimados docentes, Msc. Ing. Alejandro Mayori, por su guía, su impulso a lo largo de la maestría, reconocimiento y orientación. También agradezco al Msc. Ing. Ramiro Arce, Msc. Ing. Miguel Méndez, Msc. Ing. Febo Flores y Msc. Ing. Gustavo Barriga, por su apoyo durante esta etapa de elaboración de tesis, en las materias cursadas, por el tiempo brindado y toda su ayuda.*

*A la carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica, que me dio la oportunidad de realizar mi posgrado de maestría, complementando mi formación como Ingeniero en Materiales.*

*A todos mis amigos y colegas de la maestría, con quienes he compartido incontables horas de trabajo y buenos momentos.*

*A mi familia: mi hermana Laura, mi abuelo Carlos, mis tíos Fátima, Abraham, Javier y Franz; a mis primos y sobrinos; y a Sara, Manchas y Perla, quienes son fuente de mi alegría y siempre están presentes en los buenos y malos momentos.*

*A mi primo Carlos Torrico, quien me ayudó e impulsó a lo largo de toda la maestría, enseñándome, apoyándome y motivándome en todas las materias.*

*A Dios, fuente de sabiduría, quien me protege e ilumina en todas mis decisiones.*

*A nuestra madre, la Virgen María, que nunca nos desampara, y a San Expedito, el santo de las causas justas, que siempre está en mis oraciones.*

*Todo esto no hubiera sido posible sin el amparo que me otorgan y el amor que me inspira mi madre, María Eugenia Rivera Laffertt. Las palabras nunca serán suficientes para expresar mi agradecimiento.*

*A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.*

## **RESUMEN:**

La problemática ambiental creciente causada por los residuos plásticos, especialmente el tereftalato de polietileno (PET), requiere soluciones sostenibles.

El reciclaje de PET para producir fibras recicladas (RPET) es una estrategia prometedora, ya que reduce los desechos plásticos y genera materiales útiles para diversas aplicaciones industriales. Este estudio investigó cómo la variación de la temperatura de conformado afecta las propiedades de las fibras RPET durante el proceso de hilado centrífugo fundido.

Se realizaron experimentos controlados utilizando un equipo prototipo que permitió variar la temperatura de conformado a 260°C, 280°C y 300°C, bajo condiciones con chorro de aire y sin chorro de aire.

Los resultados mostraron que la temperatura de conformado y las condiciones del proceso tienen un impacto significativo en varias propiedades de las fibras. A temperaturas más altas, las fibras presentaron cambios en densidad y estructura molecular.

Además, el potencial de hidrógeno y el gramaje de las fibras también se vieron afectados, con una mayor degradación del polímero a medida que se aumentaba la temperatura.

Este estudio demuestra que la temperatura de conformado y las condiciones del proceso son críticas para determinar las propiedades finales de las fibras RPET, proporcionando una base sólida para el proceso de conformado y caracterización que promueve su uso en diversas aplicaciones industriales, como materiales compuestos, paneles filtrantes, materiales utilitarios y rellenos.

**ABSTRACT:**

*The growing environmental problem caused by plastic waste, especially polyethylene terephthalate (PET), requires sustainable solutions.*

*Recycling PET to produce recycled fibers (RPET) is a promising strategy as it reduces plastic waste and generates useful materials for various industrial applications. This study investigated how varying the forming temperature affects the properties of RPET fibers during the melt centrifugal spinning process.*

*Controlled experiments were conducted using a prototype device that allowed the forming temperature to be varied at 260°C, 280°C, and 300°C, under conditions with and without an air jet.*

*The results showed that the forming temperature and process conditions have a significant impact on several fiber properties. At higher temperatures, the fibers exhibited changes in density and molecular structure.*

*Additionally, the pH and the weight of the fibers were also affected, with greater polymer degradation as the temperature increased. This study demonstrates that forming temperature and process conditions are critical in determining the final properties of RPET fibers, providing a solid basis for the forming and characterization process that promotes their use in various industrial applications, such as composite materials, filter panels, utility materials, and fillers.*

# ÍNDICE

CAPITULO 1 .....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	3
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.4. OBJETIVO .....	6
1.4.1. OBJETIVO GENERAL .....	6
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.6.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	6
1.6.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL .....	7
1.6.3. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL .....	7
1.6.4. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	7
1.7. LÍMITES Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	8
1.7.1. LÍMITES.....	8
1.7.2. ALCANCES.....	8
CAPITULO 2.....	9
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	9
2.2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.2.3. EL POLIETILENO TEREFALATO (PET).....	15
2.2.3.1. Clasificación de PET.....	16
2.2.3.2. Características del PET.....	16
2.2.4. FIBRAS PET.....	18
2.2.4.1. Estructura Molecular y cristalinidad.....	18

2.2.4.2. Fracción de materia cristalina ( $\alpha$ ) .....	21
2.2.4.3. Microfibras.....	22
2.2.5. CONFORMADO DE FIBRA PET POR PROCESOS POR EXTRUSIÓN Y CENTRIFUGADO.....	22
2.2.5.1. Proceso de extrusión.....	22
2.2.5.2. Hilado centrífugo fundido. ....	24
2.2.5.3. Colector asistido por chorro de aire. ....	27
2.2.6. TEMPERATURA DE CONFORMADO (T).....	28
2.2.6.1. Temperatura de Transición Vítrea. (Tg).....	29
2.2.6.1.1. Teoría del Volumen Libre. ....	30
2.2.6.2. Temperatura de Fusión(Tm).....	31
2.2.6.3. Temperatura de degradación(Tdeg) y descomposición(Tdes). ....	33
2.2.7. CARACTERÍSTICAS DE UNA FIBRA PET. ....	34
2.2.7.1. Finura o Diámetro de finura(F). ....	34
2.2.7.2. Extremo más grueso(CEM).....	36
2.2.7.3. Coeficiente de variación del diámetro de las fibras. ....	37
2.2.7.4. Factor confort.....	38
2.2.7.5. Giro de la finura. ....	38
2.2.7.6. Curvatura de fibra .....	38
2.2.7.7. Densidad aparente( $\rho$ ).....	39
2.2.7.8. Potencial de hidrógeno (pH).....	40
2.2.7.9. Gramaje.....	41
2.2.7.10. Humedad relativa. ....	42
2.2.8. FIELTRO HÚMEDO-WET FELTING.....	42
2.2.8.1. Tensión Superficial .....	43
2.2.8.2. Capilaridad .....	43
2.2.8.3. Fricción .....	43

2.2.9.	MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA RPET .....	44
2.2.9.1.	Materiales compuestos .....	44
2.2.9.2.	Matrices Poliméricas .....	44
2.2.10.	PROCESO PARA EL RECICLADO DE FIBRA PET .....	45
CAPITULO III.....		46
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	46
3.1.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	46
3.1.1.	OPERATIVIZACIÓN DE VARIABLES. ....	46
3.1.2.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	48
3.1.3.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	48
3.1.4.	POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	48
3.1.5.	INSTRUMENTOS Y MEDICIÓN. ....	48
3.1.5.1.	Sistema OFDA ( <i>Optical-based Fibre Diameter Analyser</i> ) .....	48
3.1.5.1.1.	OFDA 4000.....	49
3.1.5.2.	Balanza analítica de precisión. ....	50
3.1.5.3.	Phmetro digital.....	51
3.1.5.4.	Kit de densidad.....	52
3.1.5.5.	Calibrador Vernier Digital 6" Acero Inoxidable, Std y mm .....	53
3.1.5.6.	Picnómetro Calibrado 25ml Gay Lussac .....	54
3.1.5.7.	Pirómetro digital laser .....	55
3.1.5.8.	Sonómetro .....	56
3.1.5.9.	Equipo de Tracción Universal .....	57
CAPITULO IV.....		59
4.	EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS .....	59
4.1.	MEDICIÓN Y EXPERIMENTACIÓN .....	59
4.1.1.	PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRA .....	59
4.1.1.1.	Proceso de conformado por fieltro en húmedo de fibra .....	64

4.1.1.2. Caracterización de fibra conformado por fieltro en húmedo.....	65
4.1.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS RPET.....	66
4.1.2.1. Potencial de hidrogeno(pH).....	66
4.1.2.2. Densidad aparente ( $\rho$ ).....	67
4.1.2.3. Gramaje.....	68
4.1.2.4. Humedad relativa.....	71
4.1.2.5. Finura( $F$ ), porcentaje en finura en muestra( $\%F$ ), coeficiente de variación(CV), extremo más largo ( $CEM$ ), factor confort(FC), Giro de finura(GF), curvatura de la finura(CU) y porcentaje de curva( $\%CU$ ).....	72
4.2. TRATAMIENTOS DE DATOS.....	77
4.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA.....	77
4.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO.....	82
CAPITULO V.....	83
5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	83
5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA.....	83
5.1.1. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: POTENCIAL DE HIDROGENO(PH) VS CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	83
5.1.2. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: DENSIDAD $g/cm^3$ VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	88
5.1.3. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: GRAMAJE $g/cm^2$ VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	92
5.1.4. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: HUMEDAD RELATIVA(%) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	96
5.1.5. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: FINURA $\mu m$ VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	100
5.1.6. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: PORCENTAJE DE FINURA(%) CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	104
5.1.7. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: COEFICIENTE DE VARIACIÓN(%); CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	108

5.1.8. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: EXTREMO MÁS LARGO; CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	112
5.1.9. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: FACTOR CONFORT(%) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	116
5.1.10. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: GIRO DE LA FINURA( $\mu\text{m}$ ) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	120
5.1.11. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: CURVATURA DE LA FINURA( <b>deg/mm</b> ), CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	124
5.1.12. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: PORCENTAJE DE CURVATURA(%); CONDICIÓN; TEMPERATURA.....	127
5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO .....	132
5.2.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POTENCIAL DE HIDROGENO(PH) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER .....	132
5.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DENSIDAD <b>g/cm<sup>3</sup></b> DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER .....	133
5.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL GRAMAJE <b>g/cm<sup>2</sup></b> DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER .....	135
5.2.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE HUMEDAD RELATIVA % DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER .....	136
5.2.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE FINURA( <b>F</b> ), PORCENTAJE EN FINURA EN MUESTRA( <b>%F</b> ), COEFICIENTE DE VARIACIÓN(CV), EXTREMO MÁS LARGO ( <b>CEM</b> ), FACTOR CONFORT(FC), GIRO DE FINURA(GF), CURVATURA DE LA FINURA(CU) Y PORCENTAJE DE CURVA(%CU) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER .....	137
5.4. RESULTADOS DE APLICACIÓN.....	149
CAPITULO VI.....	150
6.1. CONCLUSIONES .....	150
6.2. RECOMENDACIONES .....	153
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (CITAS) .....	154
8. ANEXOS .....	158

8.1.	ANEXO 1 COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE RUIDO.....	158
8.2.	ANEXO 2 RESISTENCIA TÉRMICA.....	161
8.3.	ANEXO 3 FOTOMICROGRAFÍA DE FIBRAS.....	162
8.5.	ANEXO 5 GRAFICA DE LA RELACIÓN $\log H(T)/H(TG)-T$ .....	173
8.6.	ANEXO 6 GRAFICAS DE RESIDUOS VARIABLE INDEPENDIENTE .....	174
8.7.	ANEXO 7 GRAFICAS DE INTERACCIÓN Y EFECTOS .....	181
8.8.	ANEXO 8 ENSAYO DE TRACCIÓN .....	193
8.9.	ANEXO 9 MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA RPET .....	206

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Envases de botellas PET .....	1
Imagen 2 Hilado Centrífugo por fundición.....	2
Imagen 3 Diagrama causa y efecto limitaciones tecnológicas para el reciclaje. ....	3
Imagen 4 Diagrama Causa y efecto Know-How en reciclaje de polímeros. ....	4
Imagen 5 Diagrama Causa y efecto reciclaje del RPET. ....	4
Imagen 6 Diagrama causa y efecto producción de fibras RPET. ....	5
Imagen 7 Equipo de obtención de fibra. ....	10
Imagen 8 Esquemización de proceso. ....	11
Imagen 9 Diagrama de Ishikawa contaminación ambiental. ....	12
Imagen 10 Diagrama de Ishikawa limitaciones del reciclaje.....	13
Imagen 11 Economía circular del PET. ....	14
Imagen 12 Código de identificación del PET. ....	15
Imagen 13 Formula general por grupos del PET.....	18
Imagen 14 Configuración Zig-Zag del PET .....	19
Imagen 15 Fórmula química del PET .....	19
Imagen 16 Cadena molecular del PET.....	20
Imagen 17 Modelo trifásico .....	21
Imagen 18 Conformado por extrusión del PET. ....	23
Imagen 19 Esquema del proceso de centrifugado para producción de fibras. ....	24
Imagen 20 (A) Esquema de una configuración básica de hilatura centrífuga de mesa, (B) el recorrido de un líquido.....	25
Imagen 21 Esquema y fotografías del proceso rotary jet-spinning.....	25
Imagen 22 Esquema de fuerza centrífuga .....	27
Imagen 23 Esquema de producción de fibra continua. ....	27

Imagen 24 Relación de módulo de Young, (E) y temperatura (T) de las fibras de polímero.....	29
Imagen 25 Esquema de volumen libre en la fase amorfa de fibras poliméricas.....	30
Imagen 26 Relación $\log \eta(T)/\eta(T_g)-T$ .....	31
Imagen 27 Comparación de propiedades térmicas de los polímeros cristalinos y amorfos, de cadena larga.....	32
Imagen 28 Parámetros Térmicos .....	34
Imagen 29 Diámetro de finura una fibra.....	36
Imagen 30 Microscopia fibra PET.....	37
Imagen 31 Coeficiente de variación de fibras textiles.....	37
Imagen 32 Factor confort.....	38
Imagen 33 Curvatura de fibra .....	39
Imagen 34 Ensayo de densidad.....	40
Imagen 35 Identificación de pH en textiles .....	41
Imagen 36 Ensayos de gramaje.....	41
Imagen 37 Ensayo de humedad relativa. ....	42
Imagen 38 Fibra RPET fieltro en húmedo.....	43
Imagen 39 Etapas de proceso de reciclaje de botellas PET para la producción de fibra corta de RPET.....	45
Imagen 40 Equipo OFDA 4000 .....	50
Imagen 41 Balanza Analítica ME204.....	51
Imagen 42 PHmetro OAKTON pH 700 .....	52
Imagen 43 kit de densidades OHAUS .....	53
Imagen 44 Calibrador vernier digital 6" acero inox.....	54
Imagen 45 Picnómetro calibrado 25ml.....	55
Imagen 46 Pirómetro digital DIGI-SENSE 20250-07 .....	56
Imagen 47 Sonómetro digital SL-400.....	57

Imagen 48 Máquina de prueba universal hidráulica WDW.....	58
Imagen 49 Flujograma de operación.....	59
Imagen 50 Recolección de botellas PET.....	60
Imagen 51 Triturado de termoplásticos.....	61
Imagen 52 PET Triturado.....	61
Imagen 53 Hilado Centrípeto fundido con chorro de aire.....	62
Imagen 54 Clasificación de fibras RPET.....	63
Imagen 55 Bastidor para prensado.....	64
Imagen 56 Prensado de fibra.....	64
Imagen 57 Medición de pH.....	66
Imagen 58 Medición de la densidad aparente.....	68
Imagen 59 Probetas cortadas para gramaje.....	69
Imagen 60 Pesaje de Probetas.....	70
Imagen 61 Muestras para humedad relativa.....	71
Imagen 62 Preparación de muestras.....	73
Imagen 63 Reducción de muestras.....	73
Imagen 64 Montaje de muestras.....	74
Imagen 65 Análisis de muestras microscopio OFDA 4000.....	75
Imagen 66 Lectura de parámetros del equipo.....	75
Imagen 67 Resultado de análisis OFDA 4000.....	76
Imagen 68 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados pH.....	84
Imagen 69 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Densidad.....	89
Imagen 70 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Gramaje.....	93
Imagen 71 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Humedad relativa.....	97
Imagen 72 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Finura.....	101

Imagen 73 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Porcentaje de finura .....	105
Imagen 74 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Coeficiente de variación .....	109
Imagen 75 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados CEM .....	113
Imagen 76 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Factor confort .....	117
Imagen 77 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Giro de la Finura .....	121
Imagen 78 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Curvatura de la fibra .....	125
Imagen 79 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Porcentaje de Curvatura. ....	129
Imagen 80 Comparación de pH entre fibra RPET- poliéster .....	132
Imagen 81 Error Porcentual pH. ....	133
Imagen 82 Comparación de densidad aparente entre fibra RPET- poliéster. ....	134
Imagen 83 Error porcentual densidad aparente. ....	134
Imagen 84 Comparación de gramaje entre fibra RPET- poliéster .....	135
Imagen 85 Error porcentual gramaje. ....	136
Imagen 86 Comparación de humedad relativa entre fibra RPET- poliéster. ....	136
Imagen 87 Error porcentual humedad relativa.....	137
Imagen 88 Comparación de Finura(F) entre fibra RPET- poliéster .....	138
Imagen 89 Comparación de porcentaje en finura en muestra(%F) entre fibra RPET- poliéster	138
Imagen 90 Comparación de coeficiente de variación(CV) entre fibra RPET- poliéster .....	139
Imagen 91 Comparación de extremo más largo (CEM) entre fibra RPET- poliéster.....	139
Imagen 92 Comparación de factor confort (FC) entre fibra RPET- poliéster .....	140
Imagen 93 Comparación de Giro de finura(GF) entre fibra RPET- poliéster .....	141
Imagen 94 Comparación de curvatura de la finura(CU) entre fibra RPET- poliéster .....	141
Imagen 95 Comparación de porcentaje de curvatura(%CU) entre fibra RPET- poliéster.....	142
Imagen 96 Error porcentual de Finura(F) .....	142
Imagen 97 Error porcentual de (%F) .....	143

Imagen 98 Error porcentual de coeficiente de variación(CV) .....	143
Imagen 99 Error porcentual de extremo más largo (CEM) .....	144
Imagen 100 Error porcentual de factor confort.....	144
Imagen 101 Error porcentual de Giro de finura(GF) .....	145
Imagen 102 Error porcentual de curvatura de la finura(CU).....	146
Imagen 103 Error porcentual de (%CU).....	146
Imagen 104 Fracción de materia cristalina. ....	148
Imagen 105 Grafica de contorno de fracción de materia cristalina. ....	148
Imagen 106 Frecuencia vs NRC .....	160
Imagen 107 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-260-1.....	162
Imagen 108 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-260-2.....	162
Imagen 109 Fotomicrografia 500x CC-260.....	162
Imagen 110 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-280-1.....	163
Imagen 111 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-280-2.....	163
Imagen 112 Fotomicrografia 500x CC-280.....	163
Imagen 113 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-300-1.....	164
Imagen 114 Fotomicrografia OFDA 4000 CC-300-2.....	164
Imagen 115 Fotomicrografia 500x CC-300.....	164
Imagen 116 Fotomicrografia OFDA 4000 SC-260-1 .....	165
Imagen 117 Fotomicrografia OFDA 4000 SC-260-2 .....	165
Imagen 118 Fotomicrografia 500x SC-260 .....	165
Imagen 119 Fotomicrografia OFDA 4000 SC-280-1 .....	166
Imagen 120 Fotomicrografia OFDA 4000 SC-280-2 .....	166
Imagen 121 Fotomicrografia 500x SC-280 .....	166
Imagen 122 Fotomicrografia OFDA 4000 SC-300-1 .....	167

Imagen 123 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-300-2 .....	167
Imagen 124 Fotomicrografía 500x SC-300 .....	167
Imagen 125 Fotomicrografía OFDA 4000 Poliéster (PL)-1 .....	168
Imagen 126 Fotomicrografía OFDA 4000 Poliéster (PL)-2.....	168
Imagen 127 Fotomicrografía 500x Poliéster (PL) .....	168
Imagen 128 Fotomicrografía fieltro en húmedo SC-280-1.....	169
Imagen 129 Fotomicrografía fieltro en húmedo SC-280-2.....	169
Imagen 130 Fibra con fieltro en húmedo SC-280.....	169
Imagen 131 Estructura triclinica.....	170
Imagen 132 Cadena molecular del PET.....	171
Imagen 133 Estructura del PET cristalino.....	172
Imagen 134 Relación $\log \eta(T)/\eta(T_g)-T$ RPET .....	173
Imagen 135 Grafica de residuos para pH.....	174
Imagen 136 Grafica de residuos para densidad .....	174
Imagen 137 Grafica de residuos para gramaje.....	175
Imagen 138 Grafica de residuos para Humedad Relativa.....	175
Imagen 139 Grafica de residuos Finura.....	176
Imagen 140 Grafica de residuos Porcentaje de Finura.....	176
Imagen 141 Grafica de residuos Coeficiente de variación .....	177
Imagen 142 Grafica de residuos Extremo más largo.....	177
Imagen 143 Grafica de residuos Factor Confort.....	178
Imagen 144 Grafica de residuos giro de la finura.....	178
Imagen 145 Grafica de residuos Curvatura de la Fibra.....	179
Imagen 146 Grafica de residuos porcentaje de curvatura.....	179
Imagen 147 Grafica de residuos fracción de materia cristalina.....	180

Imagen 148 Grafica de efectos principales para pH. ....	181
Imagen 149 Grafica de interacción para pH. ....	181
Imagen 150 Grafica de efectos principales para densidad.....	182
Imagen 151 Grafica de interacción para densidad.....	182
Imagen 152 Grafica de efectos principales para gramaje. ....	183
Imagen 153 Grafica de interacción para gramaje. ....	183
Imagen 154 Grafica de efectos principales para humedad relativa. ....	184
Imagen 155 Grafica de interacción para humedad relativa. ....	184
Imagen 156 Grafica de efectos principales para finura. ....	185
Imagen 157 Grafica de interacción para finura.....	185
Imagen 158 Grafica de efectos principales para porcentaje de finura. ....	186
Imagen 159 Grafica de interacción para porcentaje de finura. ....	186
Imagen 160 Grafica de efectos principales para el coeficiente de variación.....	187
Imagen 161 Grafica de interacción para coeficiente de variación.....	187
Imagen 162 Grafica de efectos principales para extremo más largo. ....	188
Imagen 163 Grafica de interacción para extremo más largo. ....	188
Imagen 164 Grafica de efectos principales para factor confort. ....	189
Imagen 165 Grafica de interacción para factor confort. ....	189
Imagen 166 Grafica de efectos principales para giro de la finura. ....	190
Imagen 167 Grafica de interacción para giro de la finura. ....	190
Imagen 168 Grafica de efectos principales para curvatura de la fibra.....	191
Imagen 169 Grafica de interacción para curvatura de la fibra.....	191
Imagen 170 Grafica de efectos principales para porcentaje de curvatura. ....	192
Imagen 171 Grafica de interacción para porcentaje de curvatura.....	192
Imagen 172 Corte de Muestras para ensayo de tracción.....	193

Imagen 173 Medición de muestras para ensayo de tracción.....	194
Imagen 174 Colocación de la muestra ensayo de tracción. ....	194
Imagen 175 Ensayo de tracción. ....	195
Imagen 176 Registro de datos Ensayo de tracción. ....	196
Imagen 177 Rotura de probetas antes del ensayo. ....	196
Imagen 178 Gráfico tensión-deformación muestra F3. ....	199
Imagen 179 Grafico tensión-deformación muestra F4. ....	201
Imagen 180 Gráfico tensión-deformación muestra F5. ....	204
Imagen 181 Resina Poliéster-Fibra RPET filtrada.....	207
Imagen 182 Resina Poliéster-Fibra RPET por capas.....	208
Imagen 183 Poliuretano Flexible - Fibra RPET .....	209
Imagen 184 Poliuretano Rígido - Fibra RPET.....	210

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del PET.....	17
Tabla 2 Propiedades técnicas.....	17
Tabla 3 Parámetros Térmicos fibras poliéster RPET.....	33
Tabla 4 Finura de fibra.....	35
Tabla 5 Operativización de variables.....	46
Tabla 6 Ficha técnica OFDA 4000 .....	49
Tabla 7 Ficha técnica Balanza Analítica ME204.....	50
Tabla 8 Medidores de pH para Laboratorio OAKTON 700.....	51
Tabla 9 Ficha técnica Kit De Densidad, Solids .....	52
Tabla 10 Ficha técnica Calibrador Vernier Digital Truper.....	53
Tabla 11 Sonómetro Trotec SL-400.....	56
Tabla 12 Información de factores.....	77
Tabla 13 Datos experimentales potencial de hidrogeno.....	78
Tabla 14 Datos experimentales densidad.....	78
Tabla 15 Datos experimentales gramaje.....	78
Tabla 16 Datos experimentales humedad relativa.....	79
Tabla 17 Datos experimentales finura.....	79
Tabla 18 Datos experimentales porcentaje de finura.....	79
Tabla 19 Datos experimentales coeficiente de variación.....	80
Tabla 20 Datos experimentales extremo más largo.....	80
Tabla 21 Datos experimentales factor confort.....	80
Tabla 22 Datos experimentales giro de finura.....	81

Tabla 23 Datos experimentales curvatura de fibra. ....	81
Tabla 24 Datos experimentales porcentaje de curvatura. ....	81
Tabla 25 Promedios de cada ensayo de caracterización. ....	82
Tabla 26 Datos de caracterización de fibra poliéster. ....	82
Tabla 27 Análisis de varianza pH.....	83
Tabla 28 Hipótesis y criterio para pH.....	84
Tabla 29 Resumen del modelo pH.....	85
Tabla 30 Coeficientes de análisis (pH).....	86
Tabla 31 Análisis de varianza Densidad.....	88
Tabla 32 Hipótesis y criterio para Densidad.....	88
Tabla 33 Resumen del modelo Densidad.....	90
Tabla 34 Coeficientes de análisis (Densidad).....	90
Tabla 35 Análisis de varianza Gramaje.....	92
Tabla 36 Hipótesis y criterio para Gramaje.....	92
Tabla 37 Resumen del modelo Gramaje.....	94
Tabla 38 Coeficientes de análisis (Gramaje).....	94
Tabla 39 Análisis de varianza Humedad relativa.....	96
Tabla 40 Hipótesis y criterio para Humedad relativa.....	96
Tabla 41 Resumen del modelo Humedad relativa.....	98
Tabla 42 Coeficientes de análisis (Humedad relativa).....	98
Tabla 43 Análisis de varianza Finura.....	100
Tabla 44 Hipótesis y criterio para Finura.....	100
Tabla 45 Resumen del modelo Finura.....	102

Tabla 46 Coeficientes de análisis (Finura).....	102
Tabla 47 Análisis de varianza Porcentaje de finura.....	104
Tabla 48 Hipótesis y criterio para Porcentaje de finura.....	104
Tabla 49 Resumen del modelo Porcentaje de finura. ....	106
Tabla 50 Coeficientes de análisis (Porcentaje de finura).....	106
Tabla 51 Análisis de varianza Coeficiente de variación.....	108
Tabla 52 Hipótesis y criterio para Coeficiente de variación.....	108
Tabla 53 Resumen del modelo Coeficiente de variación.....	110
Tabla 54 Coeficientes de análisis (CV) .....	110
Tabla 55 Análisis de varianza Extremo más largo.....	112
Tabla 56 Hipótesis y criterio para Extremo más largo .....	112
Tabla 57 Resumen del modelo Extremo más largo .....	114
Tabla 58 Coeficientes de análisis (CEM) .....	114
Tabla 59 Análisis de varianza Factor de confort. ....	116
Tabla 60 Hipótesis y criterio para Factor de confort .....	116
Tabla 61 Resumen del modelo Factor confort.....	118
Tabla 62 Coeficientes de análisis (FC) .....	118
Tabla 63 Análisis de varianza Giro de la finura. ....	120
Tabla 64 Hipótesis y criterio para Giro de la finura. ....	120
Tabla 65 Resumen del modelo Giro de finura.....	122
Tabla 66 Coeficientes de análisis (GF).....	122
Tabla 67 Análisis de varianza Curvatura de la finura.....	124
Tabla 68 Hipótesis y criterio para curvatura.....	124

Tabla 69 Resumen del modelo Curvatura.....	126
Tabla 70 Coeficientes de análisis (Curvatura) .....	126
Tabla 71 Análisis de varianza Porcentaje de curvatura. ....	128
Tabla 72 Hipótesis y criterio para Porcentaje de curvatura. ....	128
Tabla 73 Resumen del modelo Porcentaje de curvatura.....	130
Tabla 74 Coeficientes de análisis (%CU) .....	130
Tabla 75 Fracción de materia cristalina. ....	147
Tabla 76 Caracterización de fibra con fieltro húmedo.....	149
Tabla 77 Muestras Sin aislante. ....	158
Tabla 78 Muestras con aislante de fibra RPET.....	159
Tabla 79 NPS fibra RPET filtrada en húmedo.....	159
Tabla 80 Cálculo de la pérdida de transmisión de sonido STL y del coeficiente de transmisión de sonido STC.....	160
Tabla 81 Calculo del SAC y del coeficiente de reducción de ruido NRC .....	160
Tabla 82 Fotomicrografía fibra CC-260.....	162
Tabla 83 Fotomicrografía fibra CC-280.....	163
Tabla 84 Fotomicrografía fibra CC-300.....	164
Tabla 85 Fotomicrografía fibra SC-260.....	165
Tabla 86 Fotomicrografía fibra SC-280.....	166
Tabla 87 Fotomicrografía fibra SC-300.....	167
Tabla 88 Fotomicrografía fibra poliéster (PL).....	168
Tabla 89 Fotomicrografía fibra con fieltro en húmedo SC-280 .....	169
Tabla 90 Relación $\log \eta(T)/\eta(T_g)-T$ RPET .....	173
Tabla 91 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F3. ....	197

Tabla 92 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F4. ....	200
Tabla 93 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F5. ....	202
Tabla 94 Análisis comparativo ensayo de tracción.....	205
Tabla 95 Materiales compuestos con fibra RPET.....	206

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

La producción masiva de plásticos, que se originó hace más de 150 años, tuvo como objetivo primordial mejorar la vida cotidiana mediante la introducción de materiales versátiles con envases que se aprecia en la Imagen 1. Sin embargo, este progreso ha dado lugar a un desafío de alcance global: la generación de residuos plásticos de un solo uso. A medida que la producción de plásticos ha superado a la de otros materiales, se ha vuelto evidente su impacto negativo en términos ambientales, sociales y económicos.

**Imagen 1 Envases de botellas PET**



Fuente: Elaboración propia.

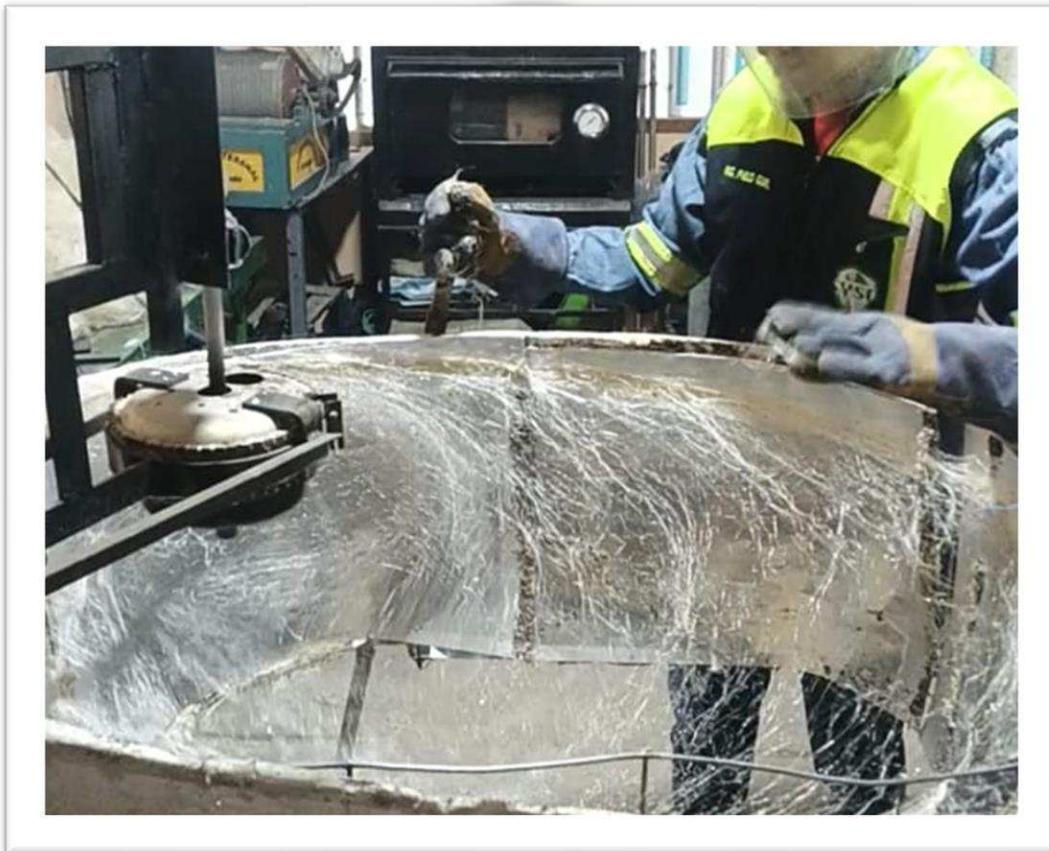
En este contexto sobre la problemática de los residuos plásticos, el enfoque en alternativas sostenibles y el reciclaje ha adquirido una relevancia inigualable. Una vía clave hacia la mitigación de esta problemática es el estudio de la fibra de tereftalato de polietileno reciclado (RPET). Esta fibra, derivada del reciclaje de envases plásticos, no solo contribuye a la reducción de desechos, sino que también se convierte en una fuente valiosa de material para diversas aplicaciones industriales.

El proceso de conformado por hilado centrífugo fundido desempeña un papel fundamental en la transformación de la fibra RPET. Este proceso conlleva cambios significativos en la temperatura que impactan directamente en las propiedades del material final. Por lo tanto, comprender cómo la temperatura de conformado influye en estas propiedades es esencial para optimizar tanto la producción como el uso de la fibra RPET.

En esta búsqueda de conocimiento, este estudio se adentra en un análisis detallado de la variación de la temperatura de conformado y su efecto en las propiedades de la fibra RPET durante el proceso de hilado centrífugo fundido.

El proceso de obtención de fibras mediante el conformado de hilado centrífugo es una técnica utilizada para producir fibras a partir de diversos materiales(termoplásticos). En este proceso, se emplea la fuerza centrífuga para extruir o estirar el material en forma de fibras delgadas y continuas (Imagen 2).

### **Imagen 2 Hilado Centrífugo por fundición**



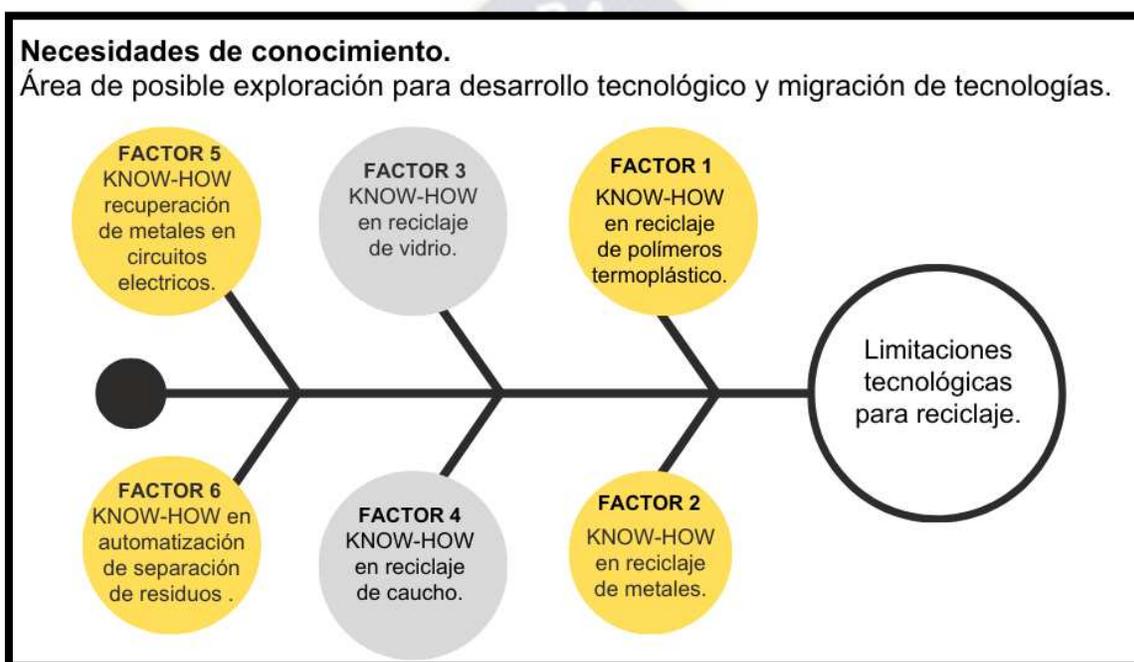
Fuente: (Bendita, Mamani, & Gumiel, 2022)

Para llevar a cabo el proceso por hilado centrífugo fundido, se utilizará un equipo prototipo experimental que permite el control y variación de la temperatura de conformado. Para los diversos ensayos de laboratorio, se emplearán equipos específicos pertenecientes al campo correspondiente. Con los resultados de estos ensayos se comparará las propiedades de la fibra a medida que se varía la temperatura. A través de esta investigación, se podrá determinar la aplicación tentativa de este producto tanto en la industria textil, construcción u otros ámbitos similares, aprovechando las ventajas de este termoplástico.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las limitaciones tecnológicas en materia de reciclaje, abren un amplio campo de investigación para el desarrollo del know-how de reciclaje de materiales como se ve en la Imagen 3, es decir de los conocimientos técnicos necesarios para implementar procesos de reciclaje de diversos materiales que se desechan diariamente, como ser: polímeros, metales, vidrio y caucho. Incluso es necesaria la investigación en los procesos de recuperación de trazas de metal, por ejemplo, en circuitos electrónicos, o en el desarrollo de sistemas de separación automática de residuos según su material.

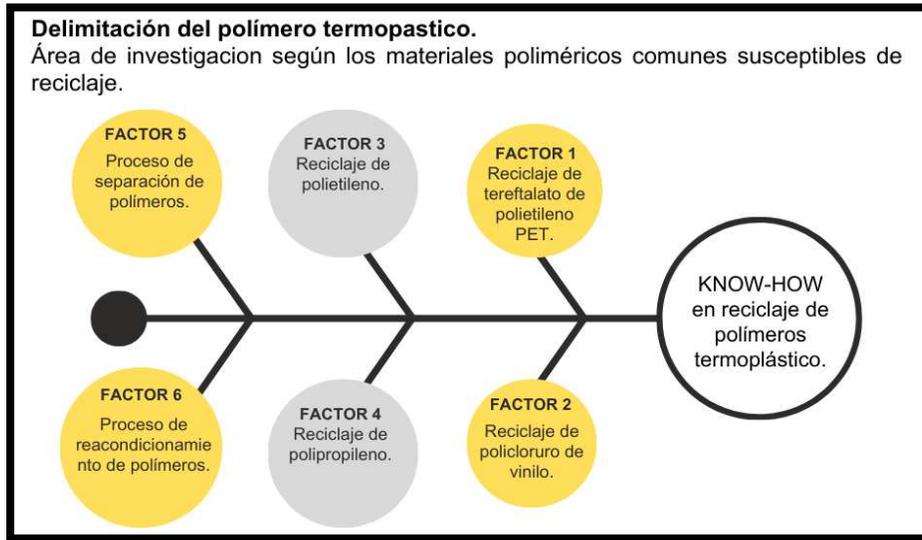
**Imagen 3 Diagrama causa y efecto limitaciones tecnológicas para el reciclaje.**



Fuente: Elaboración Propia.

Los polímeros son particularmente importantes en el desarrollo de tecnología de reciclaje como se muestra en la Imagen 4, dado que se trata de materiales que tardan lapsos considerables en su degradación. El impacto de estos polímeros sobre el medio ambiente, se vio recientemente agravado debido a la presencia de micropartículas de polímero en muestras de agua en distintos cuerpos del planeta. Por ello es necesario abordar el estudio de métodos de reciclaje de polímeros termoplásticos, como ser el PET, el polipropileno, el PVC o el polietileno.

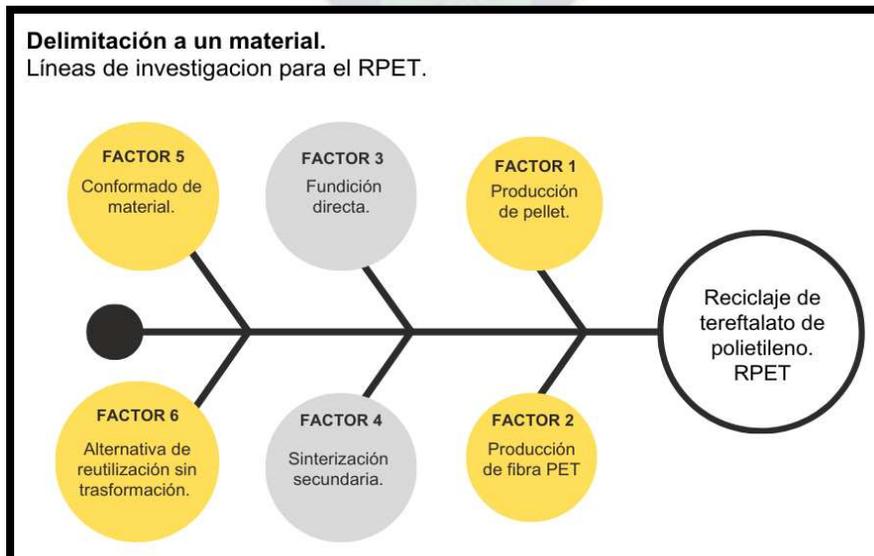
**Imagen 4 Diagrama Causa y efecto Know-How en reciclaje de polímeros.**



Fuente: Elaboración Propia.

Uno de los materiales poliméricos con propiedades muy útiles para la industria es el tereftalato de polietileno, o PET (Imagen 5). Este se encuentra en los residuos, principalmente en envases de un solo uso, como ser las botellas y los recipientes de plástico. Existen varias alternativas para reciclar este material, como ser la generación de pellets a partir de un proceso de triturado, o métodos de fundición.

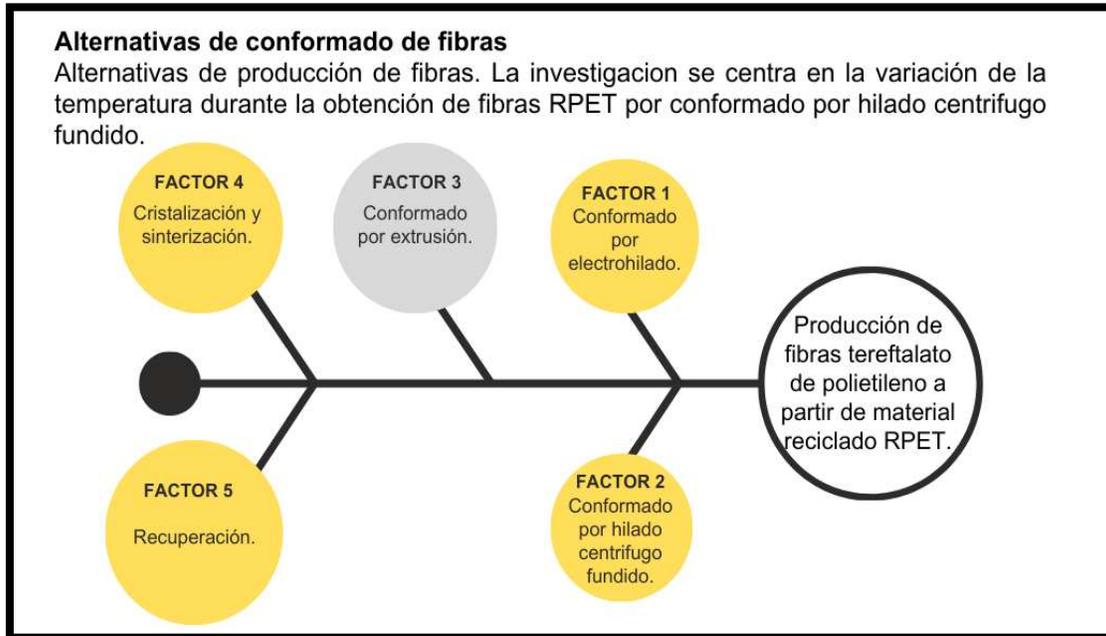
**Imagen 5 Diagrama Causa y efecto reciclaje del RPET.**



Fuente: Elaboración Propia.

Otra alternativa consiste en obtener fibra PET a partir del material reciclado (Imagen 6). Esta fibra tiene varias aplicaciones industriales como refuerzos, aislantes, rellenos, geotextiles, material de aporte y otros, donde a su vez se evita la contaminación de este material con el medio ambiente dándole otra vida útil.

**Imagen 6 Diagrama causa y efecto producción de fibras RPET.**



Fuente: Elaboración Propia.

### 1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La producción de fibra RPET mediante el conformado de hilado centrífugo fundido, carece de información en el estudio del efecto de la temperatura de conformado y su relación con las propiedades de la fibra. La temperatura, en diversas condiciones, se presenta como la variable de mayor relevancia para cualquier proceso productivo de termoplásticos.

Por lo tanto, la formulación del problema presenta la siguiente interrogante:

***¿Cuáles son los efectos de la variación de la temperatura de conformado en las propiedades de la fibra de RPET, durante el proceso de hilado centrífugo fundido?***

## 1.4. OBJETIVO

### 1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la variación de la temperatura de conformado en las propiedades de la fibra de tereftalato de polietileno reciclado, obtenido por hilado centrífugo fundido.

### 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el planteamiento del problema a partir de la identificación del mismo y determinar los objetivos de la tesis.
- Desarrollar el fundamento teórico que establezca las bases conceptuales necesarias para respaldar la investigación que se llevará a cabo.
- Determinar la metodología de investigación.
- Realizar la operativización de las variables.
- Plantear el método de investigación adecuado a nuestro estudio.
- Evaluar y plantear el tratamiento de los datos que se verificarán con la parte experimental de la tesis.
- Indicar los resultados de la investigación.
- Emitir las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

## 1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La hipótesis planteada tiene un enfoque causal al proponer una relación de causa y efecto entre las variables analizadas. Las variables independientes, en este caso, se identifican como las causas, representadas por la temperatura de conformado y la condición. Por otro lado, las variables dependientes, son las propiedades de la fibra. Por consiguiente, la hipótesis de la investigación se expresa de la siguiente manera:

***La variación de la temperatura de conformado durante el proceso de hilado centrífugo fundido, bajo diferentes condiciones, modifica las propiedades de la fibra RPET.***

## 1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

### 1.6.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

La necesidad de investigar el efecto de la temperatura de conformado en las propiedades de las fibras PET producidas a partir de materiales reciclados, se basa en la contribución técnica que este estudio aporta a un enfoque de producción más sostenible.

Esta investigación forma parte del programa de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Electromecánica, donde se promueven habilidades de investigación y análisis crítico en un contexto real, enfocado entre otros en proyectos amigables con el medio ambiente.

### **1.6.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL**

El crecimiento de los residuos plásticos de un solo uso ha generado preocupación social debido a sus efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. En este contexto, la investigación sobre la producción de fibras RPET mediante el proceso de hilado centrífugo fundido se presenta como una respuesta directa para abordar esta problemática. Al reutilizar el tereftalato de polietileno reciclado (RPET) y transformarlo en fibra, esta investigación no solo ofrece una alternativa más ecológica en la industria textil, sino que también contribuye a la reducción de residuos plásticos y a la promoción de prácticas sostenibles en la sociedad.

### **1.6.3. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL**

La contaminación del tereftalato de polietileno (PET) en el medio ambiente y la necesidad de preservar los recursos naturales, se derivan de diversas causas que otorgan una importancia ambiental a este estudio. Entre las causas destacan:

El aumento constante del consumo de productos envasados en envases de PET ha impulsado una mayor producción de este material y, como resultado, una acumulación significativa de residuos sólidos de PET en el medio ambiente.

El PET es altamente resistente a la degradación debido a su estructura química y física. Esto significa que persiste en el medio ambiente durante largos periodos.

El PET desechado puede llegar a cuerpos de agua, lo que provoca un impacto grave de contaminación y puede resultar en la muerte de animales marinos debido a la ingestión de residuos plásticos.

La acumulación de desechos de PET en vertederos y áreas naturales contaminan los suelos, lo que tiene un efecto negativo en la biodiversidad.

En este contexto, la presente investigación de las propiedades de las fibras RPET mediante la transformación de plástico reciclado, a través del método de hilado centrífugo fundido, se presenta como una vía prometedora para contrarrestar la acumulación de residuos plásticos y reducir la carga medioambiental de la industria polimérica.

### **1.6.4. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA**

La implementación de una metodología eficiente y regulada para la fabricación de fibras RPET mediante el proceso de hilado centrífugo fundido, podría brindar oportunidades significativas tanto en la industria textil como en sectores relacionados. El reciclaje del PET para la obtención de estas

fibras contribuye a una economía circular rentable, dado que la materia prima es de bajo costo y el proceso de producción no demanda tecnologías avanzadas.

Al analizar y caracterizar estas fibras, se evalúan sus propiedades y las potenciales aplicaciones en diversos campos industriales. Estas fibras podrían reemplazar con éxito la producción con materia prima virgen u otros materiales de mayor costo, mientras mantienen propiedades comparables.

Esto no solo representa un enfoque más sostenible, sino también una perspectiva rentable para las industrias que buscan alternativas más económicas y respetuosas con el medio ambiente.

## **1.7. LÍMITES Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.7.1. LÍMITES**

La investigación se centró en temperaturas de conformado específicas: 260°C, 280°C y 300°C, en las condiciones de sin chorro de aire y con chorro de aire.

Los parámetros de producción externos a las condiciones térmicas de conformado se mantendrán constantes y su variación no será parte de este estudio.

Los ensayos de caracterización se limitarán a aquellos que se puedan realizar en el laboratorio del Instituto Tecnológico Escuela Industrial Pedro Domingo Murillo y en el laboratorio de Pro Bolivia del Ministerio de Desarrollo Productivo. No se considerarán ensayos con equipos específicos en otros laboratorios.

Se mantendrán condiciones constantes en la medida de lo posible. Sin embargo, no se abordarán posibles efectos de factores externos como la humedad ambiental, las variaciones de la temperatura ambiental, las corrientes de aire y otras condiciones meteorológicas.

El estudio se limita solo al conformado de fibras con materia prima de RPET, no se tomará en cuenta la degradación del polímero, no es parte del estudio la materia prima virgen de PET, ni otro tipo de polímero termoplástico.

No se realizarán ensayos de la fibra como parte de un producto terminado en específico, limitando solo el estudio de las propiedades de la misma como materia prima.

### **1.7.2. ALCANCES**

La investigación se concentró en el análisis de las propiedades de la fibra RPET, como la finura, extremo más grueso, coeficiente de variación del diámetro de las fibras, factor confort, giro de la finura, curvatura de la fibra, porcentaje de curvatura, densidad aparente, potencial de hidrógeno, gramaje y humedad relativa. Esto se llevará a cabo mediante la variación de la temperatura de conformado en diferentes condiciones de conformado.

La clasificación de las características de la fibra RPET nos permitirá identificar su aplicación tentativa en diversos rubros.

## **CAPITULO 2**

### **2. FUNDAMENTO TEÓRICO**

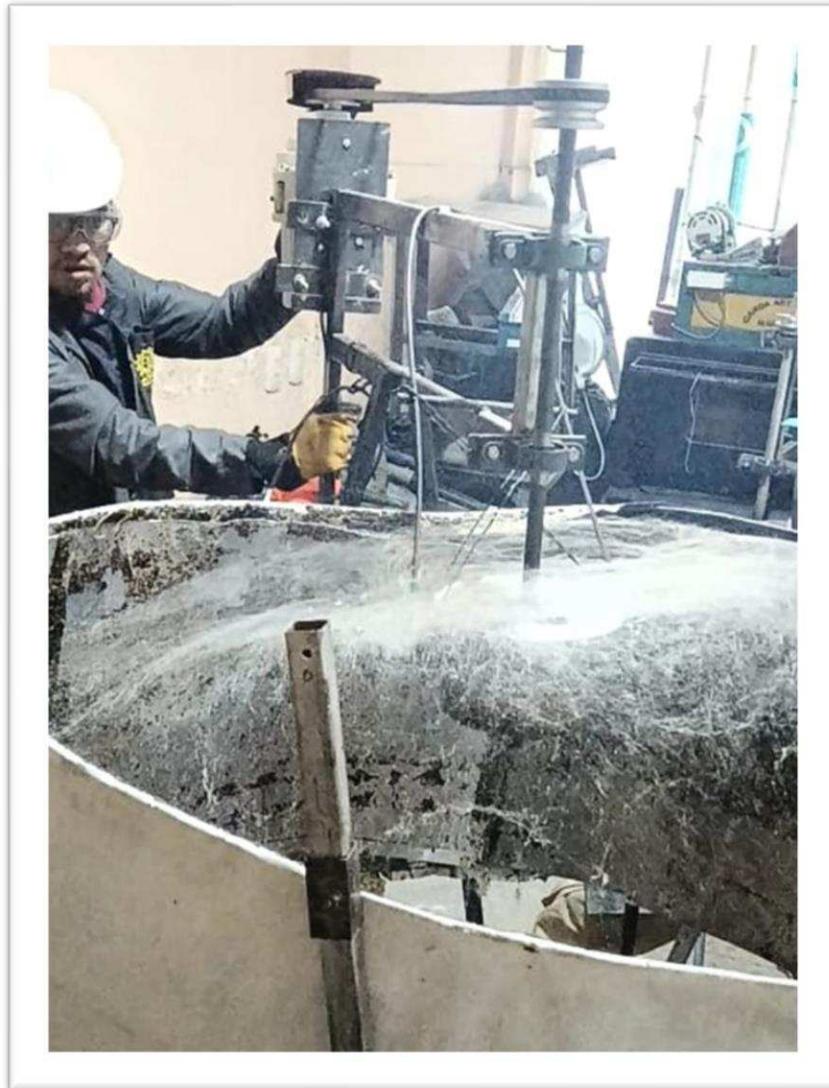
#### **2.1. ANTECEDENTES**

La creciente preocupación por el impacto ambiental de los materiales plásticos convencionales ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles y amigables con el medio ambiente. En este contexto, el tereftalato de polietileno reciclado (RPET) ha surgido como un material prometedor, reduciendo la dependencia de los recursos vírgenes y disminuyendo la acumulación de plásticos en el medio ambiente. Entre las múltiples aplicaciones del RPET, su transformación en fibras a través del método de hilado centrífugo fundido ha cobrado relevancia.

Históricamente, la producción de fibras a partir de polímeros plásticos ha involucrado procesos convencionales de extrusión y estirado. No obstante, el hilado centrífugo fundido ha introducido una perspectiva innovadora en la creación de fibras a partir de materiales plásticos fundidos.

En el año 2022, en el Instituto Tecnológico Escuela Industrial Superior Pedro Domingo Murillo, en la Carrera de Metalurgia, Siderurgia y Fundición, se llevó a cabo el desarrollo de un prototipo (Imagen 7) orientado a la obtención de fibra PET a partir de material reciclado. Sin embargo, surgieron desafíos en relación a la estandarización de los parámetros operativos del equipo utilizado, particularmente en lo que respecta a la temperatura. Esta variabilidad en las condiciones de operación resultó en la obtención de fibras con propiedades diversas, lo que complicó notablemente su caracterización precisa. A raíz de esta problemática, se plantea como premisa fundamental aprovechar este proyecto como punto de partida, incorporando mejoras ingenieriles que permitan alcanzar una producción de fibra de PET relativamente uniforme, poniendo énfasis en la influencia crucial de la temperatura de conformado en el proceso.

**Imagen 7 Equipo de obtención de fibra.**



Fuente: (Bendita, Mamani, & Gumiel, 2022).

En este contexto a través de un enfoque sistemático y experimental, se pretende analizar de manera exhaustiva cómo la variación de este parámetro operativo (temperatura de conformado), impacta directamente en las propiedades de la fibra RPET.

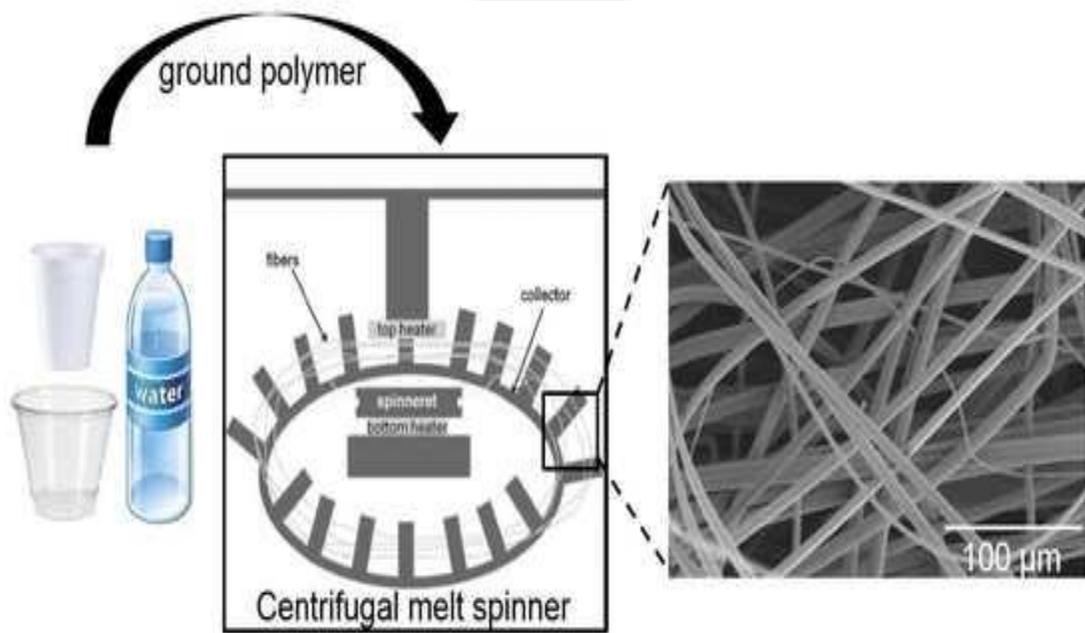
## **2.2. MARCO TEÓRICO**

En la actualidad, se encuentran en desarrollo enfoques innovadores orientados a la generación de materiales con un valor agregado significativo, a partir de materias primas de alta disponibilidad y bajo costo provenientes de flujos de reciclaje a nivel nacional. En este contexto, se aborda la extracción de fibras a partir de polímeros reciclados como se muestra en la Imagen 8,

específicamente tereftalato de polietileno, los cuales se obtienen a partir de botellas recicladas, por la técnica de hilado centrífugo fundido que implica la conversión de los polímeros en estado fundido en fibras.

Este análisis sugiere que las nanofibras y microfibras generadas a partir de diversas corrientes de residuos, tienen un potencial de aplicación diversificado. Los hallazgos resaltan la posibilidad de aprovechar materiales reciclados para la obtención de fibras con propiedades destacadas, abriendo perspectivas para su utilización en múltiples sectores industriales (E.Zander, 2017).

**Imagen 8 Esquematización de proceso.**

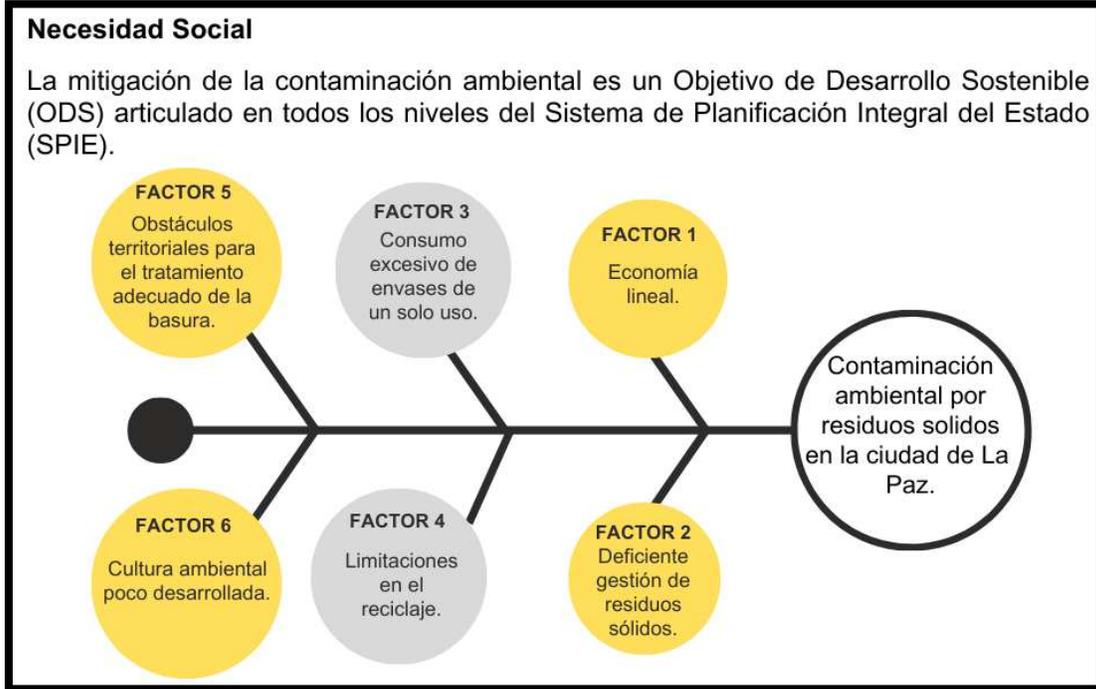


Fuente: (E.Zander, 2017)

### **2.2.1. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.**

La contaminación ambiental representa un asunto de crucial relevancia que requiere un enfoque multidisciplinario, involucrando áreas como la política, la cultura, la academia y la sociedad en su conjunto. La Organización de las Naciones Unidas ha establecido cinco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) centrados en la responsabilidad ambiental. Estos objetivos son: 11. Ciudades y comunidades sostenibles, 12. Producción y consumo responsables, 13. Acción por el clima, 14. Vida submarina y 15. Vida en ecosistemas terrestres (Imagen 9). La investigación en cuestión contribuye directamente a los objetivos 11, 12 y 13. (Maria Jose Gamez Naciones Unidas, 2022)

**Imagen 9 Diagrama de Ishikawa contaminación ambiental.**

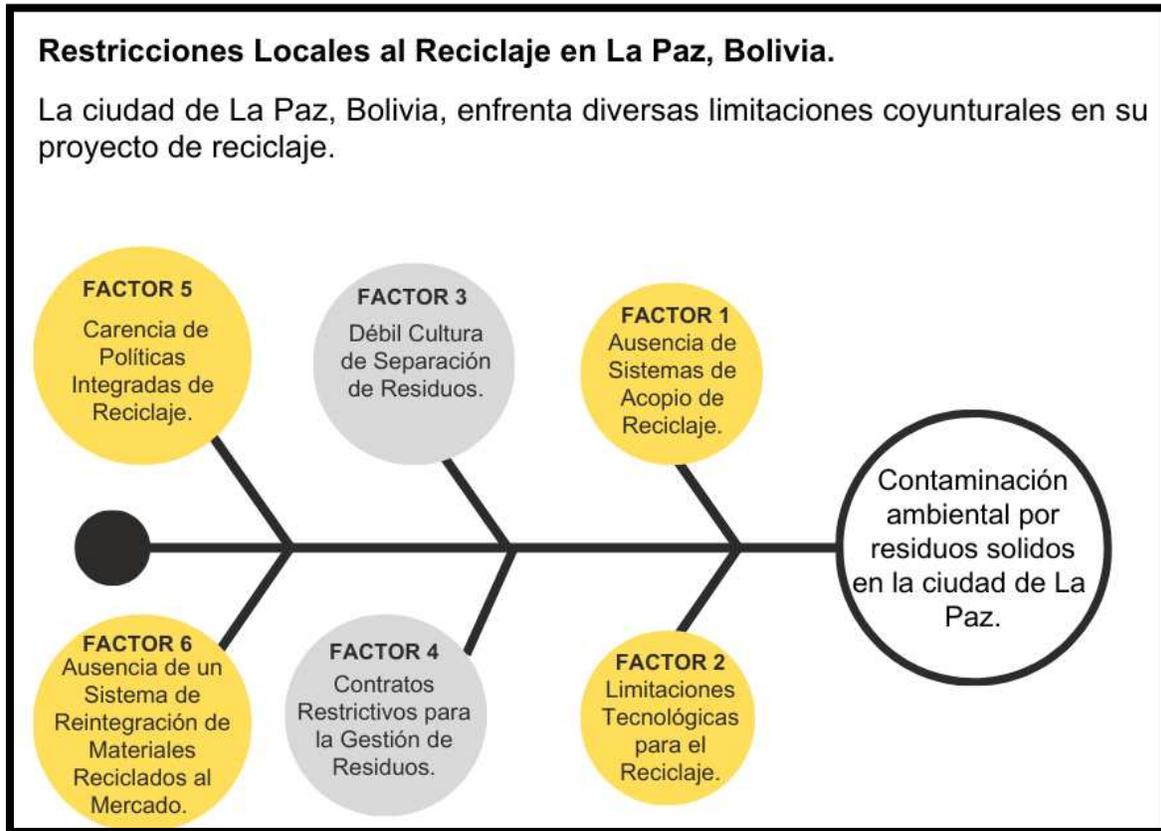


Fuente: Elaboración propia.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han sido incorporados en el contexto nacional de Bolivia. El Plan de Desarrollo Económico y Social (PDES) para el período 2020-2025 alinea los pilares de la Agenda Patriótica 2025 con los ODS. Así, el Sistema de Planificación Integral del Estado integra su implementación de forma transversal en todos sus niveles. No obstante, las particularidades de la situación local pueden representar obstáculos en la consecución de los ambiciosos planes de desarrollo que el gobierno busca implementar.

En el ámbito medioambiental, se identifican diversas limitaciones que deben ser superadas, frecuentemente mediante avances tecnológicos, antes de enfrentar de manera efectiva el problema de la contaminación ambiental. En la ciudad de La Paz, la gestión de residuos sólidos es un desafío constante debido a varios factores que complican la consecución de los objetivos de las políticas municipales (Imagen 10). Entre estos factores se encuentran las barreras geográficas para el manejo adecuado de la basura, una conciencia ambiental aún en desarrollo, y un consumo elevado de envases de un solo uso, generando una cantidad significativa de residuos, como botellas. Además, una economía fuertemente basada en "kioscos" promueve un modelo lineal en el uso de recursos y una gestión no óptima de los residuos sólidos. A esto se añaden las limitaciones tecnológicas para establecer sistemas eficientes de tratamiento de desechos, como el reciclaje.

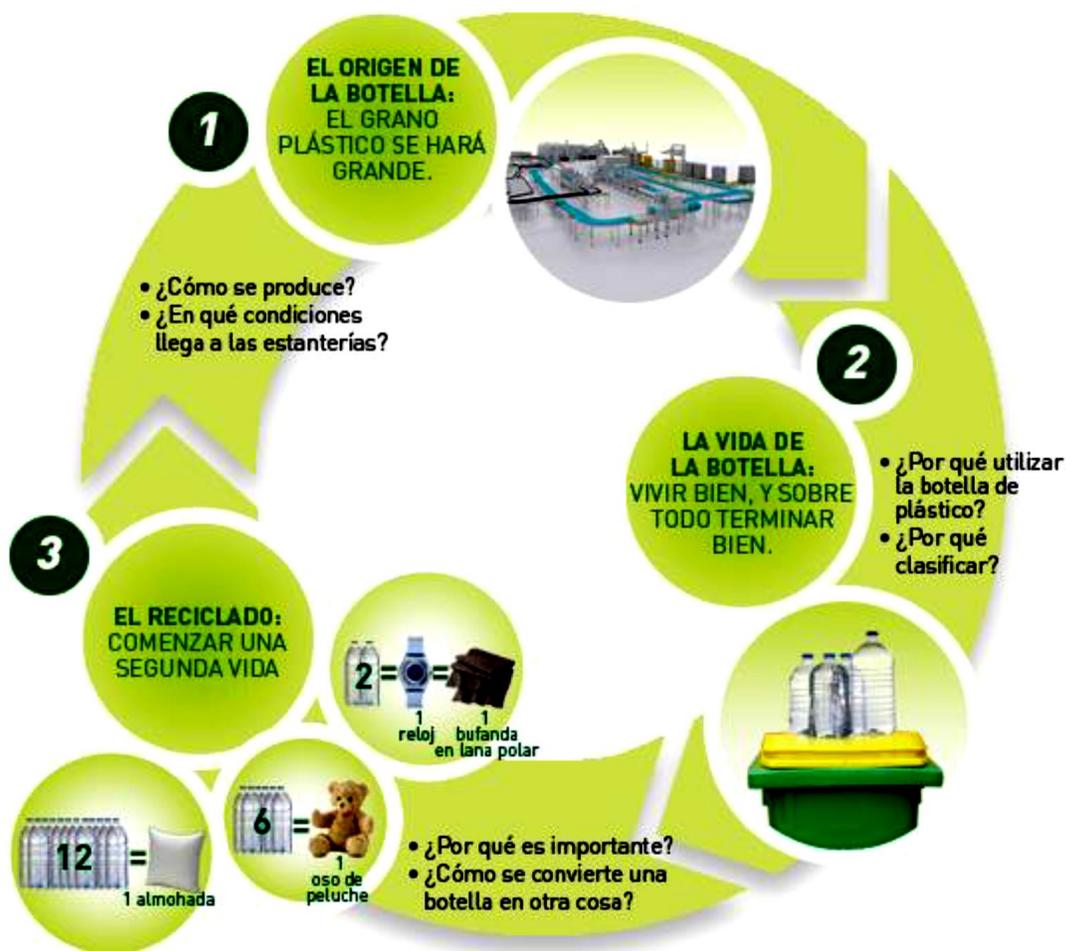
Imagen 10 Diagrama de Ishikawa limitaciones del reciclaje.



Fuente: Elaboración propia.

La creciente contaminación ambiental, provocada por plásticos, es una preocupación palpable. A pesar de que se han instaurado puntos de recolección con separación de materiales en distintas zonas para gestionar los desechos, el volumen de botellas de tereftalato de polietileno (PET) y otros productos plásticos excede la capacidad del vertedero municipal. Esta problemática agrava la contaminación urbana debido al lento proceso de descomposición de dichos materiales. Muchos de estos ítems no son reciclables a causa de limitantes como la insuficiencia de espacio para su almacenamiento, los altos costos asociados al reciclaje industrial y la falta de alternativas que faciliten su reciclado y reincorporación a la economía local (Imagen 11) en forma de productos de alta calidad. (HILOSVD, 2012)

Imagen 11 Economía circular del PET.



Fuente: (HILOSVD, 2012)

### 2.2.2. LOS PLÁSTICOS EN LA CIUDAD DE LA PAZ.

En su informe “Diagnóstico sobre la producción, uso y disposición final de plástico de un solo uso en Bolivia” (WWF-BOLIVIA, 2021) el impacto ambiental es de alrededor de 285.000 toneladas de plásticos (60% material manufacturado, 20% material primario y 20% material no primario) con un costo aproximado de 560 millones de dólares.

En cuanto a la disposición de residuos, según (WWF-BOLIVIA, 2021) se estima que el 12% en promedio de los residuos urbanos son plásticos en Bolivia. Las actividades de reciclaje son desarrolladas por asociaciones de acopiadores informales, el principal material plástico aprovechado son las botellas PET.

Según (Mamani Churata & Limachi Lima, 2022) en la ciudad de La Paz, según las proyecciones, la cantidad de residuos sólidos generados alcance las 259.193,69 toneladas anuales para el año

2020, q se basa en una tasa per cápita municipal de  $0,74 \frac{kg-Persona}{día}$ . Donde los residuos sólidos representan el 11,16% del total de desechos, y los plásticos PET constituyen aproximadamente el 1,86% de los materiales reciclables. Esto se traduce en una producción anual de 4.763,24 toneladas de PET. Sin embargo, se observa que el 75,33% de los residuos plásticos PET no se recuperan, generando un volumen total de 1.170,33 toneladas, equivalente al 24,67%.

La falta de recolección adecuada de residuos plásticos PET impacta negativamente el relleno sanitario, saturándolo por su lento proceso de degradación (300-1000 años). Esta situación, agravada por la mezcla con otros desechos, genera lixiviados y representa un grave problema ambiental, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero durante su eliminación (Mamani Churata & Limachi Lima, 2022).

### **2.2.3. EL POLIETILENO TEREFALATO (PET).**

La tendencia creciente en la industria es hacia la utilización del PET (Imagen 12), un polímero termoplástico que se produce mediante un proceso de polimerización del ácido tereftálico y el monoetilenglicol. Este material está disponible en diversas presentaciones y puede ser moldeado a través de varios métodos, como extrusión, inyección e incluso termoformado. Se destaca por su transparencia y claridad.

**Imagen 12 Código de identificación del PET.**



Fuente: (Segura & Laura, 2015)

En la actualidad, el PET juega un papel primordial en el envasado de líquidos destinados al consumo humano debido a su capacidad de no liberar moléculas dañinas para el cuerpo humano, además de su resistencia a la deformación y su propiedad de mantener su claridad. Sin embargo, este material, que se consume en grandes cantidades, genera desechos sólidos que son difíciles de biodegradar de manera natural.

El PET se compone de petróleo crudo, gas y aire. Aproximadamente el 64% de su composición por peso proviene del petróleo, el 23% de derivados líquidos del gas natural y el 13% restante de aire (García & Tapia, 2007). La producción de PET implica la oxidación del paraxileno, extraído

del petróleo crudo, para obtener ácido tereftálico, mientras que el etileno, derivado del gas natural, se oxida con aire para producir etilenglicol. La combinación de ácido tereftálico y etilenglicol da lugar al PET como producto final (Guerra, 2021).

#### **2.2.3.1. Clasificación de PET.**

Existen los siguientes tipos de PET:

APET: Polietileno amorfo Tereftalato. El polímero PET se encuentra como cristalino cuando está en forma de pellets y se vuelve no cristalino o amorfo durante la extrusión. Antes de su utilización los trozos de PET deben ser recristalizados para poder ser utilizados en usos que requieran mantener las propiedades mecánicas a temperaturas altas, debido a que este tipo de material se reblandece a partir de la transición vítrea (80°C). Dicho material no puede ser utilizado en la fabricación de los envases a una calidad normal, ya que no puede resistir temperaturas cercanas a 100°C.

PET reciclado, se divide en:

PET post-industrial: Residuos de operaciones de arranque o scrap producido por operaciones de elaboración, los cuales no son utilizados de nuevo en el producto principal.

PET post-consumo(RPET): “Esencialmente son botellas de gaseosas recicladas” (Zea & Gary, 2019).

#### **2.2.3.2. Características del PET.**

Según (Zea & Gary, 2019) las principales características de los PET son:

- Alto índice de translucidez, aunque permite usar diferentes tintes.
- Alto índice de fortaleza ante el deterioro y erosión. - Buen índice de deslizamiento. Resistencia química y térmica elevada.
- Muy buen obstáculo al CO<sub>2</sub>, admisible al O<sub>2</sub> y la humedad.
- Adaptable a otros materiales utilizados como barrera, los cuales mejoran la calidad al ser usados en conjunto.
- Es un material que puede ser reciclado, sin embargo, esto reduce su índice de viscosidad.
- Apto para su uso en artículos que tengan contacto indirecto o directo con productos alimenticios.

Las características físicas del PET y su alto grado de adaptabilidad para realizar diferentes especificaciones de índole técnico, son los principales motivos por los cuales el PET ha sobrepasado un alto grado de crecimiento no solo en los envases (botellas, etc.), sino también en la industria textil, elaborando fibras textiles.

### 2.2.3.3. Propiedades del PET.

El polietileno tereftalato posee una serie de propiedades que lo hacen muy preciado tanto en el sector industrial, como en el alimentario por su uso y aplicación como se ve en la Tabla 1.

**Tabla 1 Propiedades del PET.**

Propiedad	Descripción
Dureza y rigidez.	Puede utilizarse en contacto con alimentos debido a sus características de no toxicidad.
Transparencia.	Si bien esta propiedad lo caracteriza, también admite distintas cargas de colorantes.
Resistencia química.	Este material por su resistencia química puede entrar en contacto con diferentes disolventes y aceites sin estropearse.
Producto ignífugo.	Rechaza la combustión protegiéndose contra el fuego.
Amplia resistencia.	Posee resistencia al desgaste, a los impactos y a la rotura.
Reciclabilidad.	Es un plástico reciclable, lo que lo hace respetuoso con el medio ambiente.

**Fuente:** (Zea & Gary, 2019)

Las propiedades técnicas del PET (Juarez, Santiago, & Vera, 2011) ,se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2 Propiedades técnicas.**

Propiedades	Unidad	Valor típico
Viscosidad Intrínseca.	<i>dl/g</i>	0,783
Densidad.	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	1,33-1,34
Color.	-	Cristal
Forma física.	-	Hojuela (flaker)
Tamaño.	<i>cm</i>	1,25
Origen.	-	Botellas
Temperatura de transmisión vítrea.	<i>°C</i>	69-115
Resistencia a la tracción.	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>	55,89
Módulo de elasticidad.	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>	599,96
Resistencia al impacto.	-	No rompe.
Punto de fusión.	<i>°C</i>	260
Densidad Aparente.	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	0,85
Índice de fluidez.	<i>g/10min</i>	40,16

Fuente: (Juarez, Santiago, & Vera, 2011)

## 2.2.4. FIBRAS PET

Las fibras sintéticas han revolucionado la industria textil desde su introducción. Entre estas fibras, el poliéster, específicamente el tereftalato de polietileno o PET, ha emergido como una de las más predominantes en términos de producción y aplicabilidad.

El poliéster se clasifica dentro de las fibras sintéticas derivadas del petróleo. Según la normativa ISO 2076 (International Organization for Standardization, 2021), se define como un polímero que contiene al menos un 85% en peso de un éster, específicamente derivado de un diol y del ácido tereftálico.

Las investigaciones de Milagros Tranche destacan las propiedades inherentes del PET, como su resistencia, ligereza y versatilidad. Estas características lo hacen ideal para una variedad de aplicaciones, desde textiles hasta industriales. Además, su capacidad para resistir arrugas y su facilidad de teñido (Tranche, 2012).

### 2.2.4.1. Estructura Molecular y cristalinidad.

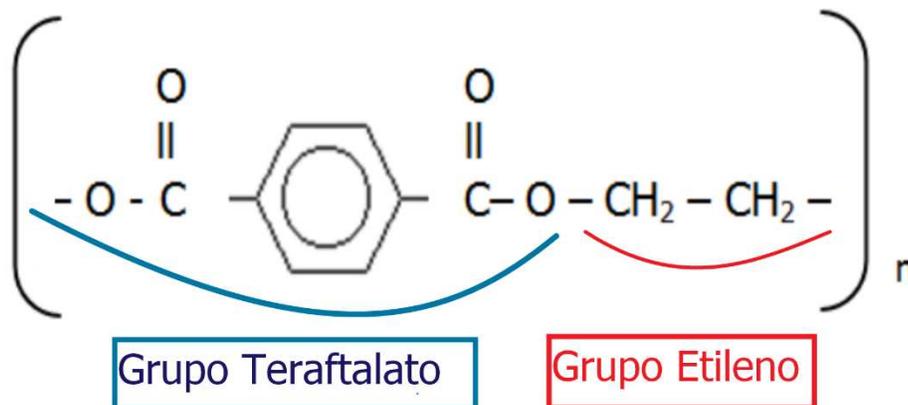
En el caso del PET como fibra el peso molecular oscila entre 15,0 y 20,0 kg/mol. Además, su grado de polimerización se encuentra en un rango de 85 a 130, y es capaz de alcanzar una cristalinidad máxima del 60%.

La estructura de la fibra PET se analiza desde tres perspectivas distintas:

#### ✓ Configuración de las Cadenas Poliméricas Individuales

Las cadenas poliméricas del PET se caracterizan por su flexibilidad, lo que les permite agruparse en estructuras reticulares con relativa facilidad. Estas cadenas contienen unidades repetitivas del tipo  $-(C_{10}H_8O_4)_n-$  (formula general) como se aprecia en la Imagen 13.

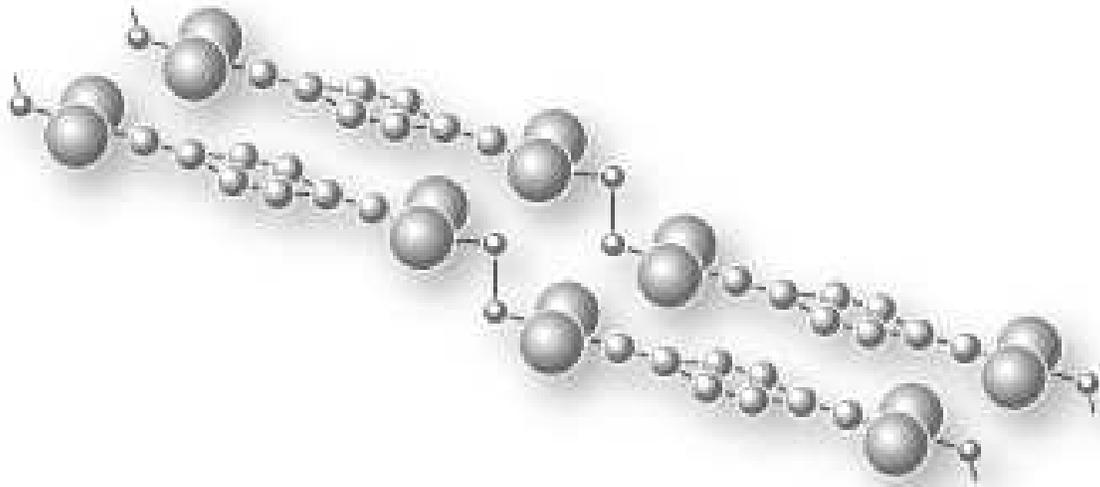
**Imagen 13** Formula general por grupos del PET.



Fuente: Elaboración Propia.

Estas secuencias metilénicas, por su parte, tienden a adoptar una configuración en zig-zag transplanar completamente extendida, configuración que es preferente debido a que corresponde al estado de menor energía potencial del polímero como se muestra en la Imagen 14 (Tranche, 2012).

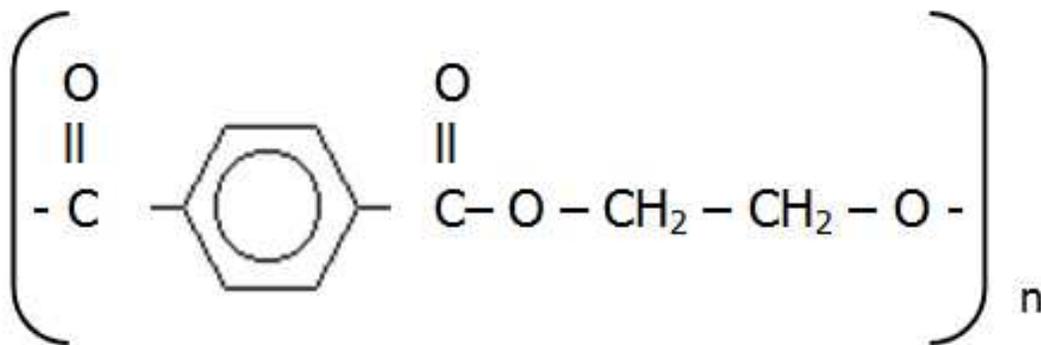
**Imagen 14 Configuración Zig-Zag del PET**



Fuente: (Tranche, 2012)

La estructura química de las fibras de tereftalato de polietileno (PET) se representa mediante la notación en líneas de la fórmula estructural básica  $-(CO - C_6H_6 - CO - O - CH_2 - CH_2 - O) -$ , donde la unidad que se replica es "n", como se muestra en la fórmula semidesarrollada química de la Imagen 15.

**Imagen 15 Fórmula química del PET**

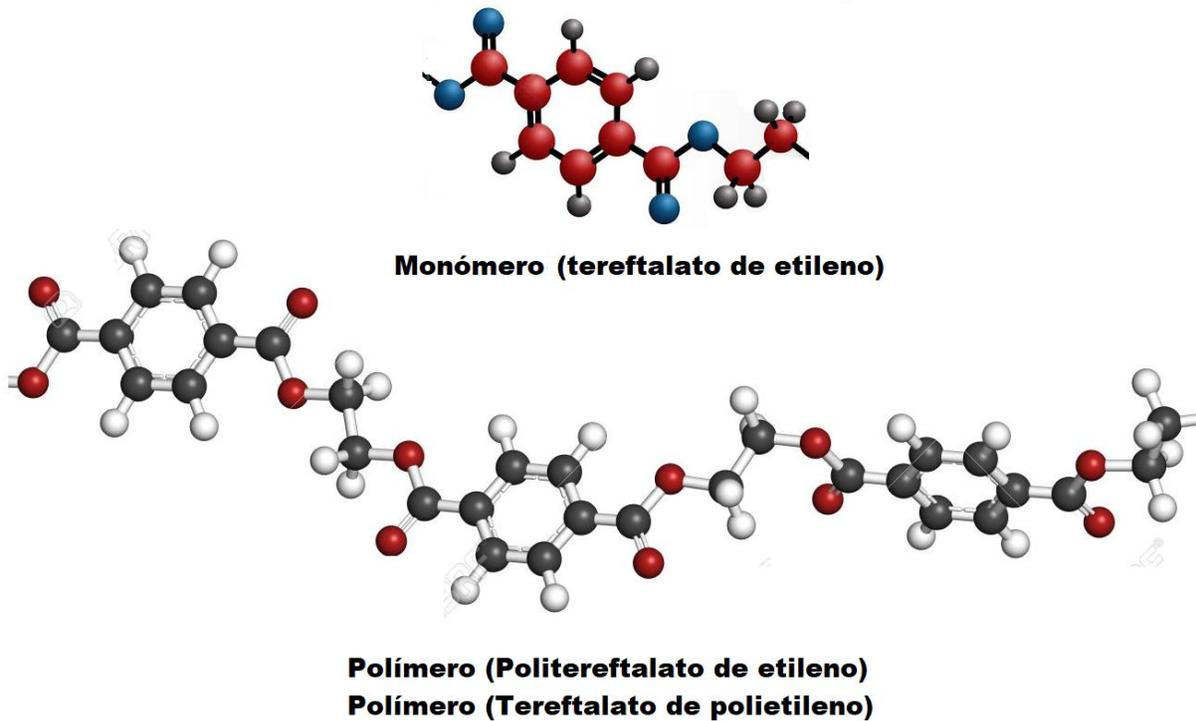


Fuente: (Tranche, 2012)

### ✓ Agrupación de las Cadenas en una Malla Cristalina

A nivel microscópico, las cadenas poliméricas individuales del PET se agrupan para conformar regiones cristalinas (Imagen 16). Dichas regiones son zonas en las que las cadenas se disponen de manera ordenada y regular.

**Imagen 16 Cadena molecular del PET**



Fuente: (Tranche, 2012)

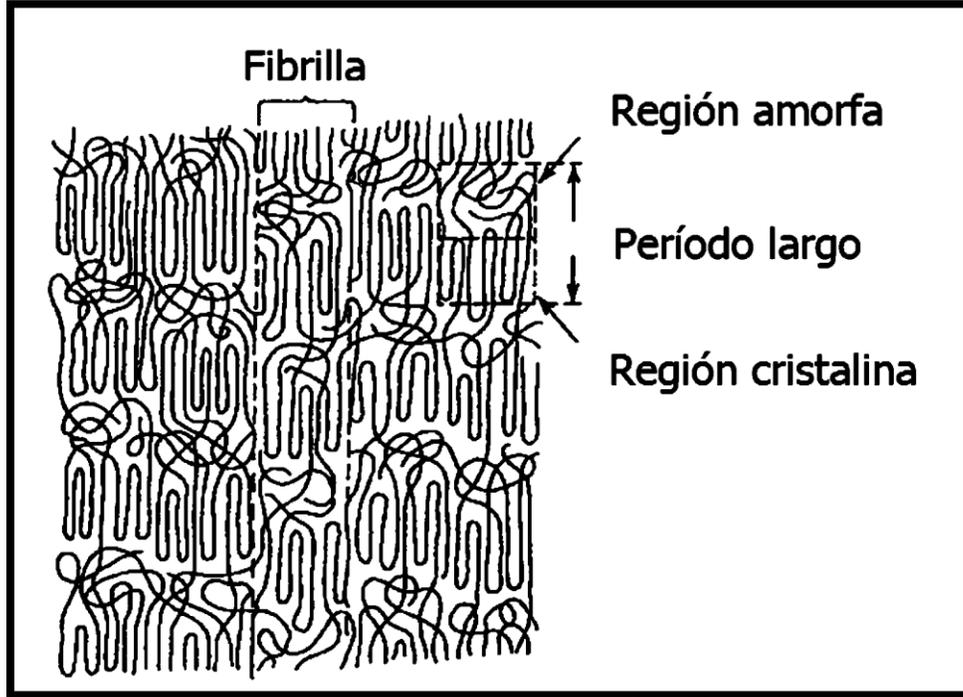
### ✓ Integración de la red cristalina en la estructura global de la fibra.

Dentro de la estructura general de la fibra de poliéster PET, se observa que la integración de la red cristalina sigue un patrón conocido como modelo trifásico. Al enfriarse desde su estado fundido, el PET experimenta un proceso de cristalización. A pesar de ello, una porción considerable de su estructura mantiene una disposición desordenada, típica del estado líquido, a la que se le denomina material amorfo o desordenado. Esta particularidad conduce a que, una vez solidificado, el material pueda experimentar una transición vítrea (Tranche, 2012).

Las fibras presentan las siguientes tres fases (Imagen 17).

- Región amorfa de las microfibrillas.
- Región cristalinas dentro de las microfibrillas.
- El material interfibrilar.

Imagen 17 Modelo trifásico



Fuente: (Tranche, 2012)

#### 2.2.4.2. Fracción de materia cristalina ( $\alpha$ )

Según (Tranche, 2012) la fracción de materia cristalina ( $\alpha$ ) en un sustrato de poliéster PET puede calcularse mediante la ecuación de Daubeny, Bunn y Brown. Este método de cálculo utiliza la densidad del material totalmente amorfo y la del material 100% cristalino para realizar una interpolación y determinar la fracción cristalina. La ecuación es expresada como:

$$\alpha = \frac{\rho_{cristalino} (\rho - \rho_{amorfo})}{(\rho_{cristalino} - \rho_{amorfo}) * \rho}$$

Donde:

$\rho_{cristalino}$  = Densidad del PET cristalino.

$\rho_{amorfo}$  = Densidad del PET amorfo.

$\rho$  = Densidad del sustrato de RPET.

$\alpha$  = Fracción de masa cristalina.

Cuando la fracción de material cristalino es negativa, nos indica la presencia de una fibra amorfa. A medida que esta fracción disminuye, se evidencia una mayor uniformidad en la estructura del material (Tranche, 2012).

### **2.2.4.3. Microfibras**

Las microfibrillas son componentes esenciales en la estructura de las fibras, especialmente en fibras sintéticas como el poliéster. Estas entidades estructurales bien definidas juegan un papel crucial en determinar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras.

Las microfibrillas de las fibras de poliéster se componen de una alternancia de regiones amorfas y cristalinas. Las regiones amorfas, también conocidas como cadenas extendidas, son aquellas en las que las moléculas de polímero no están ordenadas en una estructura regular. Por otro lado, las regiones cristalinas, o cadenas plegadas, son áreas donde las moléculas de polímero están organizadas en una estructura repetitiva y ordenada.

Una característica distintiva de las microfibrillas es su regularidad en dimensiones a lo largo del eje de la fibra, lo que permite considerarlas como una microrred. Esta regularidad es esencial para las propiedades de la fibra, ya que afecta su resistencia, elasticidad y otras características mecánicas.

Para estudiar las características y la estructura interna de las microfibrillas, se utiliza la difusión de rayos X de pequeño ángulo. Esta técnica permite obtener información detallada sobre la organización y el tamaño de las regiones amorfas y cristalinas dentro de la microfibrilla.

El "período largo" es otro aspecto crucial de la microfibrilla. Se refiere al espacio entre dos cristalitos adyacentes dentro de la microfibrilla. En términos más específicos, la longitud del cristalito a lo largo del eje de la microfibrilla representa aproximadamente  $2/3$  de la longitud total del período largo. Esta proporción es vital para entender cómo las microfibrillas contribuyen a las propiedades generales de las fibras de poliéster (Palacios, 2012).

### **2.2.5. CONFORMADO DE FIBRA PET POR PROCESOS POR EXTRUSIÓN Y CENTRIFUGADO.**

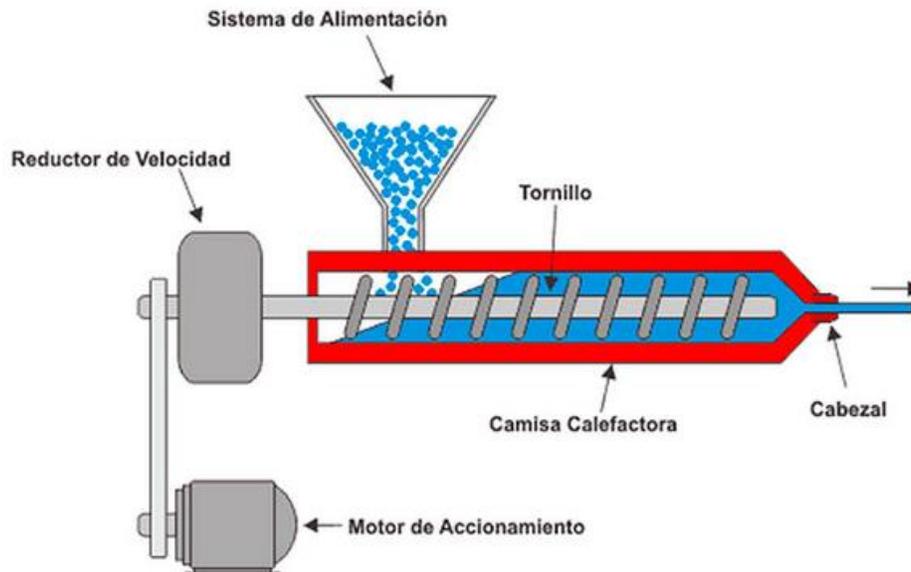
El conformado de fibra PET puede ser obtenido por extrusión o por centrifugado. Según (López, 2016), existen diferentes procesos de transformación de PET en fibras de poliéster, que permiten que estas se usen como relleno de colchones o almohadas, hasta como fibras de alta calidad para la confección en la industria textil.

#### **2.2.5.1. Proceso de extrusión.**

De acuerdo con (AM GROUP, s.f), "La extrusión es un proceso continuo como se ve en la Imagen 18, en la cual los productos acabados se obtienen forzando material fundido a través de una herramienta de conformación (hilera, cabezal de extrusión, orificio)". Siendo el método convencional para la fabricación de fibra PET.

El material utilizado en el proceso de extrusión se caracteriza por un alto nivel de viscosidad, y los productos se obtienen con una sección transversal de la forma deseada, como por ejemplo el plástico.

### Imagen 18 Conformado por extrusión del PET.



Fuente: (Juarez, Santiago, & Vera, 2011)

La extrusión, en otras palabras, puede ser considerada como un complejo proceso físico-químico que tiene lugar bajo la influencia de fuerzas mecánicas, alta temperatura y humedad.

Las materias primas procesadas se calientan por calor, que se libera durante el proceso de superar la fricción interna y la deformación del material, y también debido al calentamiento externo, debido al uso del tornillo sin fin dentro del proceso de extrusión.

Cuando se realiza el proceso de extrusión, se produce un proceso industrial de fundir y moldear el plástico a flujo constante de presión y fuerza, para obtener la forma deseada de cierto polímero para su aplicación final.

Entre los principales métodos de extrusión podemos citar los siguientes:

- Los que incluyen la formación en frío.
- El tratamiento térmico.
- El método de “extrusión en caliente” (moldeo).
- El método de moldeo por inyección de plásticos.

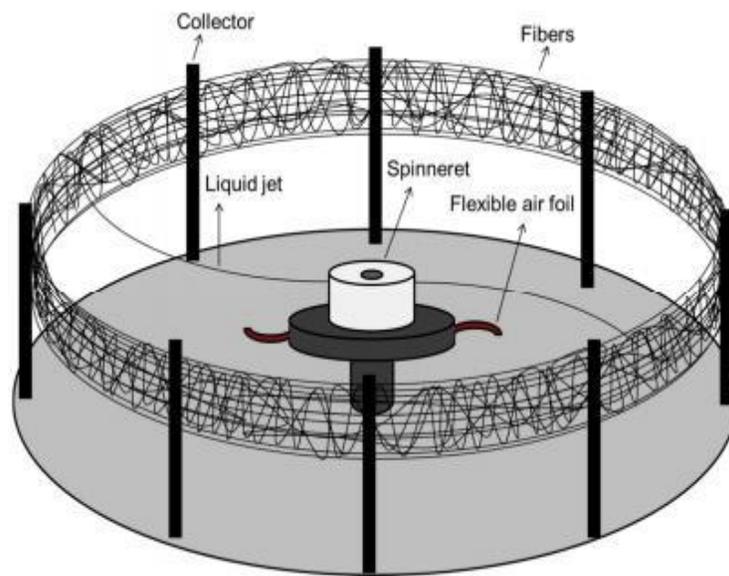
Los procesos de extrusión son generalmente usados para piezas sólidas (ladrillos, bloques, perfiles, paneles, etc.), para tuberías principalmente de PVC, polietileno, polipropileno, coextrusión (polietileno-polipropileno) y para filamentos o fibras plásticas de polietileno y PET.

### 2.2.5.2. Hilado centrífugo fundido.

El método de rotary jet-spinning (RJS) también conocido como hilado centrífugo fundido, es una técnica altamente eficaz en la producción de microfibras. Este proceso implica la utilización de un depósito perforado que gira a alta velocidad en torno a su eje de simetría como se ve en la Imagen 19. Esta rotación genera la expulsión de un chorro líquido polimérico a través del orificio del depósito. Este chorro líquido se estira, se deshidrata y finalmente se solidifica, dando lugar a la formación de fibras a una escala nanométrica (Mellado, McIlwee, & Goss, 2012).

Este proceso de hilatura centrífuga, se ha utilizado ampliamente en la industria de la fibra de vidrio, para la fabricación de fibras a escala industrial. “El uso de la hilatura centrífuga para producir fibras de polímero, especialmente las fibras de PET, es relativamente nuevo” (Zhang X. &, 2014).

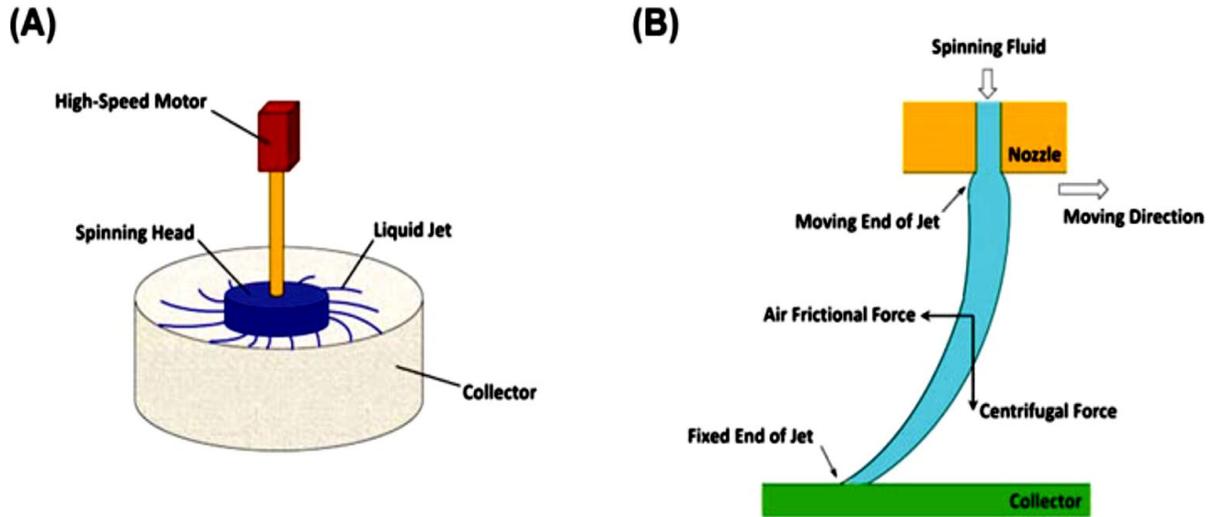
**Imagen 19 Esquema del proceso de centrifugado para producción de fibras.**



Fuente: (Zhang X. &, 2014)

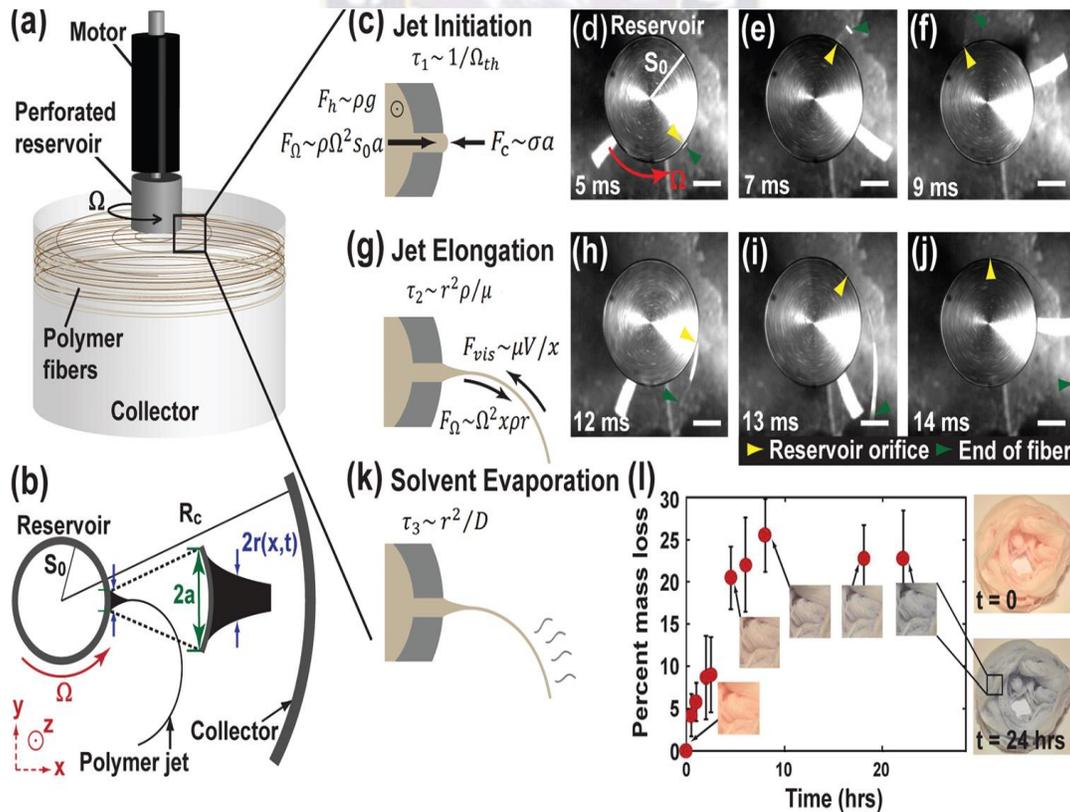
Cuando el depósito gira a una velocidad que supera un umbral específico, determinado por el equilibrio entre las fuerzas capilares y centrífugas, se origina un flujo viscoso que es eyectado a través de un pequeño orificio, que se estira debido a la evaporación del solvente, que es posible debido a la amplia área superficial relacionado con su volumen (Imagen 20). El flujo se desplaza hacia afuera en una trayectoria espiral, siendo extendido por las fuerzas centrífugas, mientras que el solvente se evapora a una velocidad determinada por el coeficiente de difusión del solvente a través del polímero.

Imagen 20 (A) Esquema de una configuración básica de hilatura centrífuga de mesa, (B) el recorrido de un líquido.



Fuente: (Zhang X. &, 2014)

Imagen 21 Esquema y fotografías del proceso rotary jet-spinning.



Fuente: (Mellado, McIlwee, & Goss, 2012).

En la Imagen 21 se ilustra el diseño del equipo utilizado en el método de rotary jet-spinning (RJS). Este esquema ofrece una vista general del aparato y cómo opera. Además, se presenta un diagrama desde una perspectiva superior que representa la proyección de una fibra desde el depósito hacia el colector. Asimismo, se incluyen imágenes fotográficas que capturan: el inicio del proceso de elongación del flujo desde el depósito y su posterior prolongación. (Mellado, McIlwee, & Goss, 2012).

El flujo continúa su recorrido hasta que alcanza las paredes de un colector cilíndrico estacionario con un radio R. Aquí, el solvente restante se evapora por completo, lo que conduce a la solidificación de las fibras. Estas fibras solidificadas pueden ser recolectadas y utilizadas posteriormente según las necesidades. (Mellado, McIlwee, & Goss, 2012).

Para este proceso, el material se expulsa del orificio cuando la fuerza centrífuga es mayor que la tensión superficial del polímero fundido utilizado como se ve en la Imagen 22.

La fuerza centrífuga se define por:

$$F_c = \frac{m * w^2 * D}{2} (N)$$

Donde:

m=Masa del fluido.

W=velocidad de rotación del cabezal.

D=Diámetro de giro.

La fuerza de fricción de la fibra aplicada al flujo se determina por:

$$F_{fri} = \frac{\pi C \rho A w^2 D^2}{2} (N)$$

Donde:

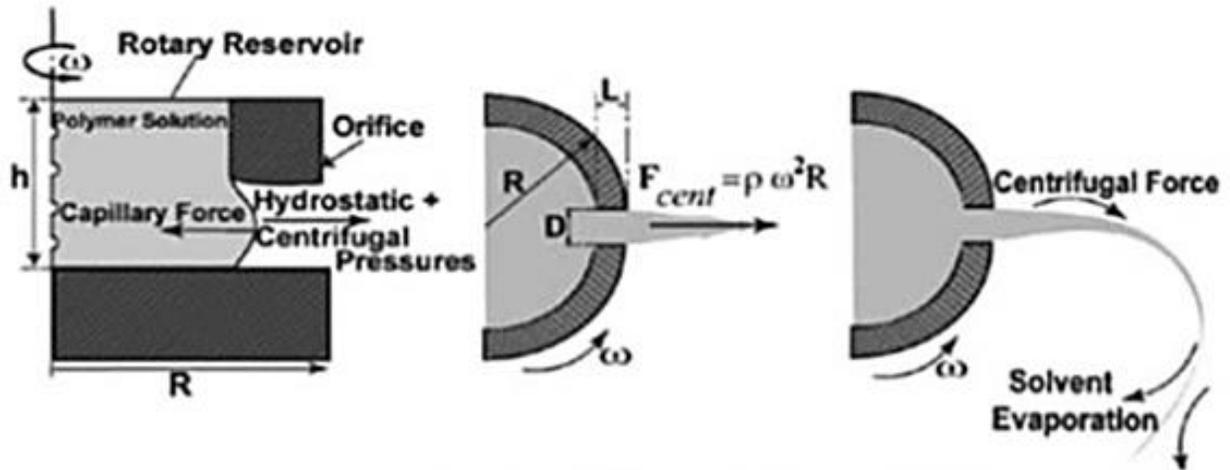
*C = Coeficiente de arrastre numerico.*

*$\rho =$  Densidad del aire;  $\frac{1,225Kg}{m^3}$*

*A = Área de la seccion transversal del chorro: 0,000628m<sup>2</sup>*

*D = Diámetros de la trayectoria del chorro; 50cm*

Imagen 22 Esquema de fuerza centrífuga.

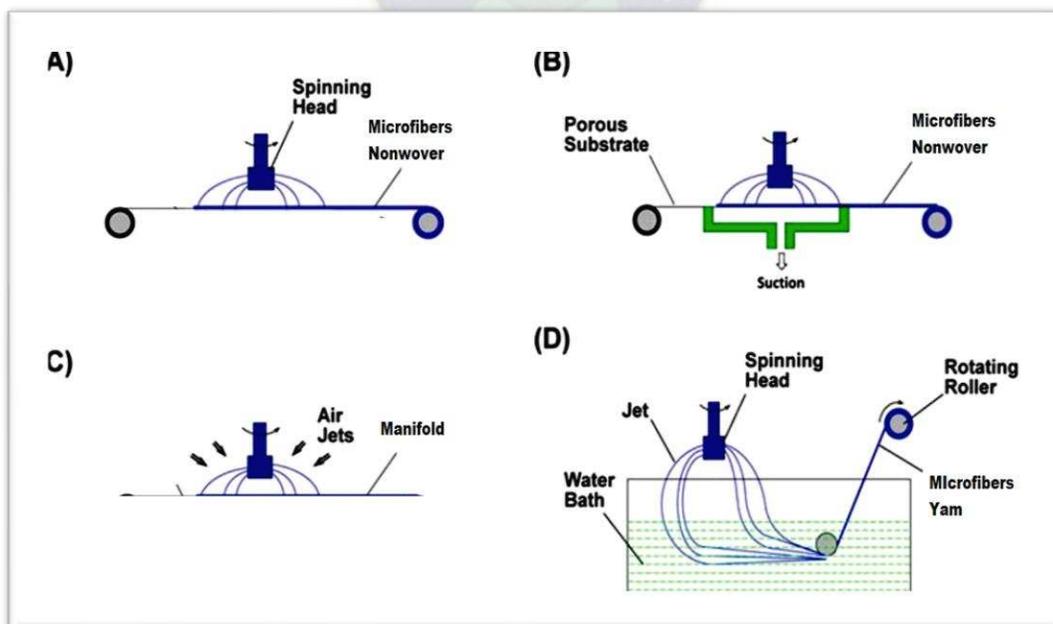


Fuente: (Guerra, 2021)

### 2.2.5.3. Colector asistido por chorro de aire.

El colector asistido por chorro de aire es un dispositivo esencial empleado en el proceso de recolección de fibras durante la ejecución del método de hilado centrífuga. Este dispositivo despliega un enfoque innovador para capturar y acumular de manera eficiente la fibra generadas en dicho proceso, permitiendo así su posterior utilización en diversas aplicaciones.

Imagen 23 Esquema de producción de fibra continua.



Fuente: (Zhang X. &, 2014)

La Imagen 23 del esquema de producción de fibra continua, muestra diferentes configuraciones utilizando la hilatura centrífuga. Específicamente, muestra un sustrato móvil colocado debajo de la cabeza de hilatura (a), el uso de fuerza de succión para ayudar a la recolección de no tejidos de microfibras (b), el uso de chorros de aire para ajustar la distribución y densidad de empaque de los no tejidos de microfibras (c), y un recolector de hilo para la recolección de hilos continuos de microfibras (d).

El funcionamiento de un colector asistido por chorro de aire se basa en la combinación de dos factores fundamentales: la fuerza centrífuga generada por la rotación del sistema y el flujo de aire controlado.

En el proceso de hilado centrífugo, las fibras son estiradas y dirigidas hacia el exterior del depósito debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el chorro líquido polimérico.

El colector asistido por chorro de aire se sitúa estratégicamente en la trayectoria de las fibras proyectadas desde el depósito. El flujo de aire controlado que emana del dispositivo tiene varios propósitos clave. En primer lugar, el aire asiste en la dirección y recogida de las fibras, guiándolas hacia el área de recolección designada. Además, el flujo de aire también juega un papel crítico en la evolución de las fibras. Ayuda a la evaporación más rápida y eficiente del solvente restante presente en las fibras, lo que contribuye a su solidificación y, por ende, a la formación de estructuras coherentes.

El colector asistido por chorro de aire no solo mejora la eficiencia en la recolección de fibras no tejidas, sino que también permite un mayor control sobre la calidad y las características de las fibras resultantes. Al regular el flujo de aire y la disposición del colector, es posible ajustar la densidad, el tamaño y otras propiedades de las fibras recolectadas, lo que tiene implicaciones significativas en diversas aplicaciones, como la fabricación de materiales avanzados, productos textiles de alto rendimiento y dispositivos médicos, entre otros. (Zhang X. &., 2014)

#### **2.2.6. TEMPERATURA DE CONFORMADO (T)**

La temperatura de conformado es la temperatura crítica de operación para un sistema o equipo específico, que sirve para asegurar resultados óptimos.

Esta temperatura es determinada y controlada por el operador, basándose en parámetros externos relevantes o directamente relacionados con el equipo utilizado. La elección de la temperatura de conformado es crucial, ya que afecta directamente las propiedades finales del material o producto en proceso.

En el caso específico de las fibras de poliéster, durante el proceso de conformado, la temperatura mínima debe ser igual o superior a la temperatura de fusión, mientras que la temperatura máxima debe ser igual o inferior a la de descomposición. Para estudiar variaciones en las propiedades de la fibra en respuesta a cambios de temperatura, se realiza un incremento o decremento de 20 °C en

el rango de temperaturas. No obstante, es crucial señalar que este valor puede variar según las especificaciones del fabricante del material o las condiciones particulares de la aplicación.

Las fibras pueden experimentar la transición vítrea, la fusión, la degradación y la descomposición cuando se calientan. (Zhang X. , 2014)

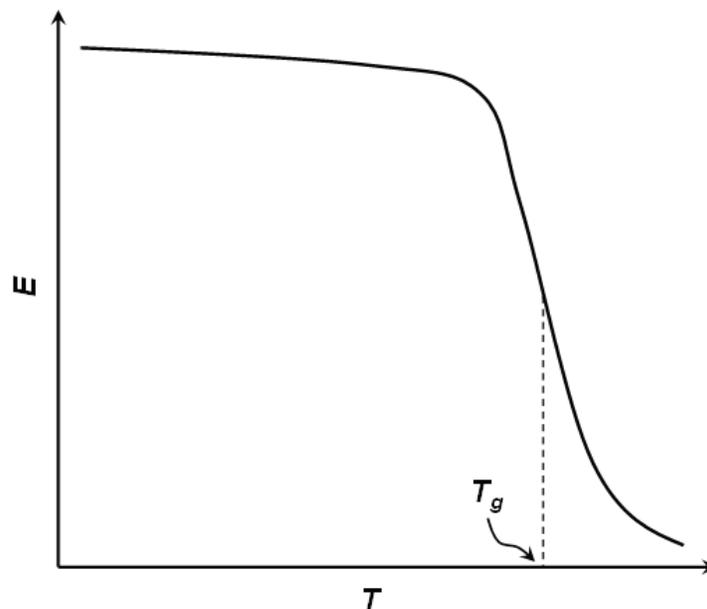
### 2.2.6.1. Temperatura de Transición Vítrea. ( $T_g$ )

La Temperatura de Transición Vítrea ( $T_g$ ) describe el punto en el que un material amorfo, como un polímero vítreo, cambia de un estado rígido y frágil a uno más flexible y viscoso.

Como detalla el libro *Fundamentals of Fiber Science* (Zhang X. , 2014), las fibras de polímero suelen ser semicristalinas. La fase amorfa de estas fibras muestra una transición vítrea, es decir, un cambio reversible de un estado duro y vítreo a un estado blando y gomoso. A la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), se produce un movimiento a gran escala de segmentos de cadena de polímero en la fase amorfa de las fibras de polímero.

Cuando la temperatura es inferior a  $T_g$ , los segmentos de cadena de polímero no tienen tiempo suficiente para moverse, lo que resulta en que las fibras tengan un alto módulo de Young y se encuentren en un estado vítreo como se ve la Imagen 24 .

**Imagen 24 Relación de módulo de Young, ( $E$ ) y temperatura ( $T$ ) de las fibras de polímero.**



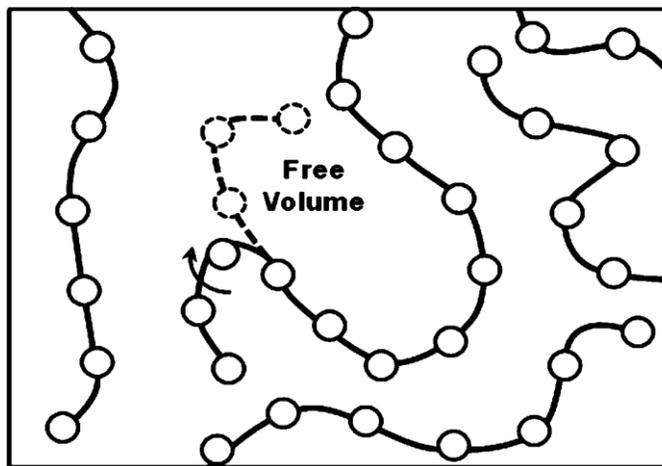
Fuente: (Zhang X. , 2014)

A medida que la temperatura se acerca a  $T_g$ , los segmentos de cadena de polímero comienzan a moverse, provocando que las fibras entren en un estado gomoso, y su módulo disminuye rápidamente.

### 2.2.6.1.1. Teoría del Volumen Libre.

Según (Zhang X. , 2014) una fibra de polímero se puede considerar compuesta por un volumen ocupado y un volumen libre. La transición vítrea es un punto en el cual hay suficiente volumen libre para que los segmentos de cadena de polímero se muevan y cambien sus posiciones como se ve (Zhang X. , 2014).

**Imagen 25** Esquema de volumen libre en la fase amorfa de fibras poliméricas.



Fuente: (Zhang X. , 2014)

El volumen ocupado aumenta con el incremento de la temperatura, y la tasa de expansión del volumen ocupado permanece constante (es decir,  $\frac{dV_o}{dT} = constante$ ) tanto por debajo como por encima de  $T_g$ . Por encima de  $T_g$ , los segmentos de cadena de polímero pueden moverse, y el volumen libre aumenta con una tasa de expansión fija. La viscosidad puede relacionarse con la fracción de volumen libre mediante la ecuación de Doolittle detallada a continuación.

$$\log\left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_g)}\right) = \frac{-C1(T - T_g)}{C2 + (T - T_g)}$$

Donde :

$C1$ =Constante universal para fibras=17,4

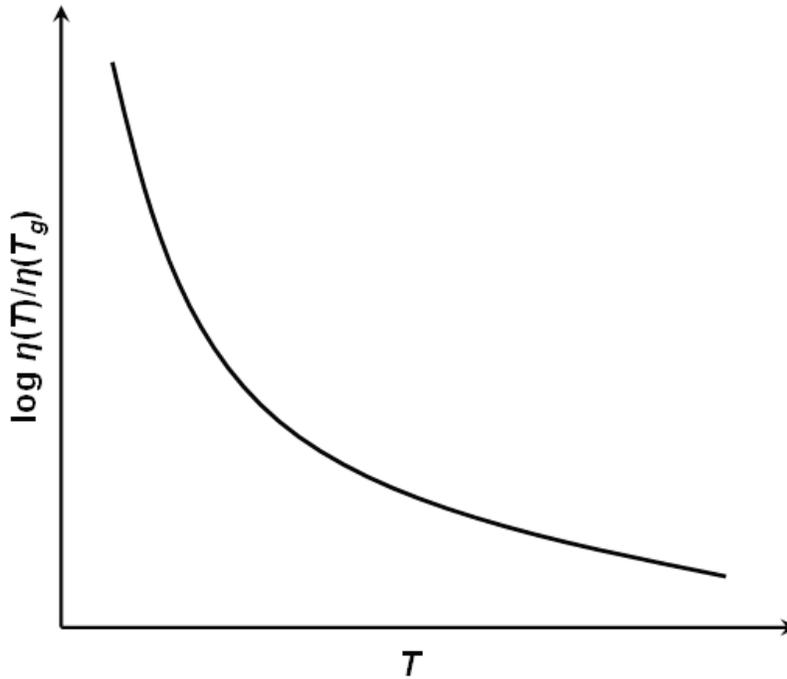
$C2$ =Constante universal para polimeros=51,6

$\eta(T)$  = viscosidad de volumen libre

$\eta(T_g)$  = viscosidad de volumen libre de  $T_g$

Con el aumento de la temperatura, el volumen libre se expande y la viscosidad disminuye como se ve en la Imagen 26.

Imagen 26 Relación  $\log \eta(T)/\eta(T_g)-T$



Fuente: (Zhang X. , 2014)

A temperaturas superiores a  $T_g$ , la integridad de las fibras de polímero se mantiene en gran medida debido al efecto de entrecruzamiento físico de las regiones cristalinas. Cuando la temperatura continúa aumentando y supera la temperatura de fusión ( $T_m$ ), la fase cristalina de las fibras de polímero se funde. Las fibras de polímero se vuelven más pegajosas y eventualmente pierden la integridad y se contraen en glóbulos fundidos. Por lo tanto, la fusión de las fibras de polímero es un proceso "irreversible" (Zhang X. , 2014).

#### 2.2.6.2. Temperatura de Fusión( $T_m$ ).

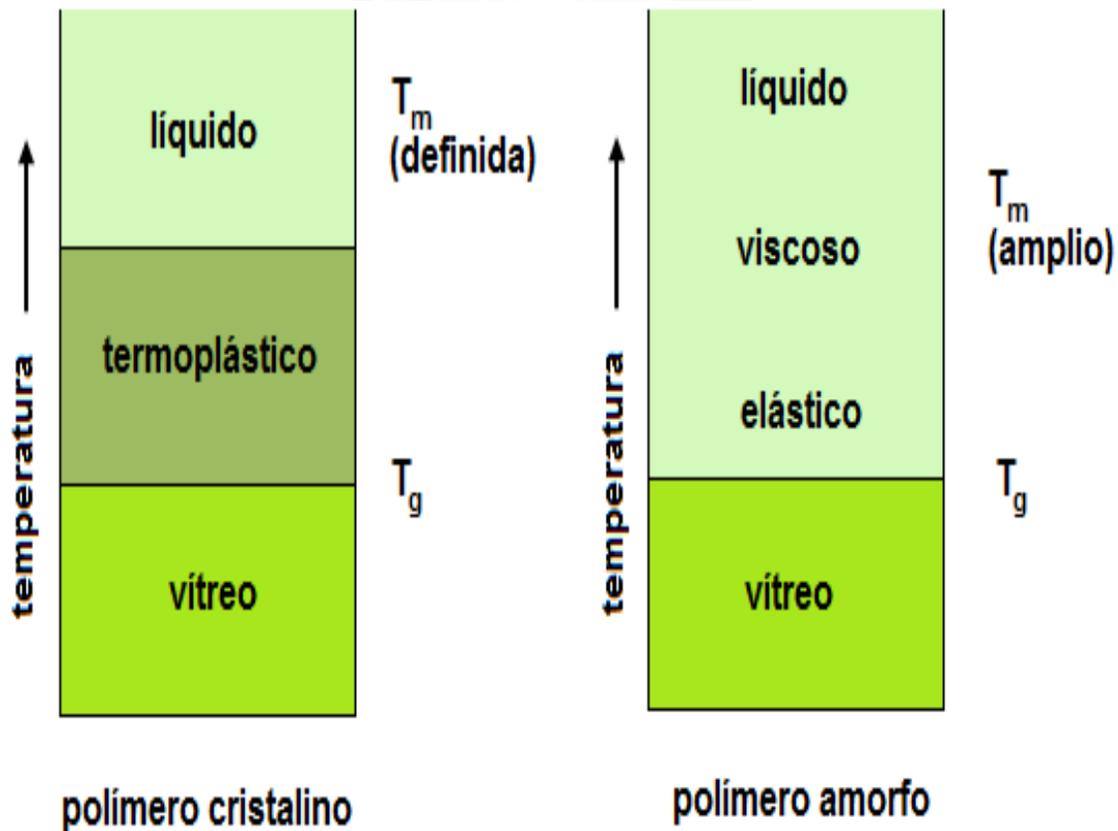
La temperatura de fusión es la temperatura específica a la cual un material cambia su estado de agregación de sólido a líquido. En el contexto de los polímeros y otros materiales termoplásticos, la temperatura de fusión es el punto en el cual la estructura molecular ordenada del material sólido se rompe, permitiendo que las moléculas se vuelvan más móviles y el material se transforme en un estado líquido.

La fusión de las fibras de polímero es una transición de primer orden que implica una cantidad latente de calor. Durante dicha transición, la fase cristalina absorbe una cantidad fija de energía. Debido a que la energía no puede transferirse instantáneamente entre la fase cristalina y su entorno, el proceso de fusión está asociado con "regiones de fase mixta", en las cuales algunas partes de la fase cristalina han completado la transición y otras no (Zhang X. , 2014).

Según (Parales Castro, 2012) ,los polímeros de cadena larga con baja cristalinidad (amorfos) se vuelven elásticos cuando se calientan por encima de su Temperatura de Transición Vítrea ( $T_g$ ). A temperaturas más elevadas, estos polímeros pueden volverse pegajosos y menos sólidos, hasta alcanzar un estado líquido viscoso sin un punto de fusión definido ( $T_m$ ).

En contraste, los polímeros entrecruzados pueden mantener su elasticidad y no fundir hasta que la temperatura sea lo suficientemente alta como para iniciar la descomposición del polímero. Es importante destacar que estos polímeros entrecruzados exhiben propiedades distintas en comparación con los polímeros cristalinos y amorfos de cadena larga cuando se calientan. La estructura entrecruzada contribuye a la estabilidad térmica y a la retención de la elasticidad a temperaturas más altas antes de la descomposición. En cambio, los polímeros cristalinos y amorfos pueden experimentar cambios en sus propiedades físicas a temperaturas más bajas debido a la transición vítrea y la fusión, respectivamente, como se aprecia en la Imagen 27.

**Imagen 27 Comparación de propiedades térmicas de los polímeros cristalinos y amorfos, de cadena larga.**



Fuente: (Parales Castro, 2012)

### 2.2.6.3. Temperatura de degradación(Tdeg) y descomposición(Tdes).

Según (Zhang X. , 2014) la temperatura de degradación (Tdeg) se refiere al punto en el cual un material comienza a experimentar cambios significativos en su estructura, propiedades o rendimiento debido a la acción de factores térmicos (alrededor de 280-310°C en fibras de poliéster).

Durante la degradación, el material puede experimentar procesos como la ruptura de enlaces químicos, cambios en la estructura molecular, pérdida de propiedades mecánicas y térmicas, entre otros.

La degradación puede ser reversible o irreversible, dependiendo de la naturaleza de los cambios que ocurren en el material.

Según (Zhang X. , 2014) la temperatura de descomposición(Tdes) es el punto en el cual un material se descompone químicamente, resultando en la formación de productos gaseosos, líquidos y/o sólidos diferentes de la sustancia original (aproximadamente 310-500°C en fibras de poliéster).

Durante la descomposición, los enlaces químicos en el material se rompen, y el material se convierte en productos más simples debido a la acción del calor, oxidación, u otros procesos químicos.

La descomposición suele ser un proceso irreversible y puede estar asociada con la liberación de gases, humos, o cambios visuales notables en el material.

Para las fibras de poliéster RPET podemos definir los siguientes parámetros térmicos.

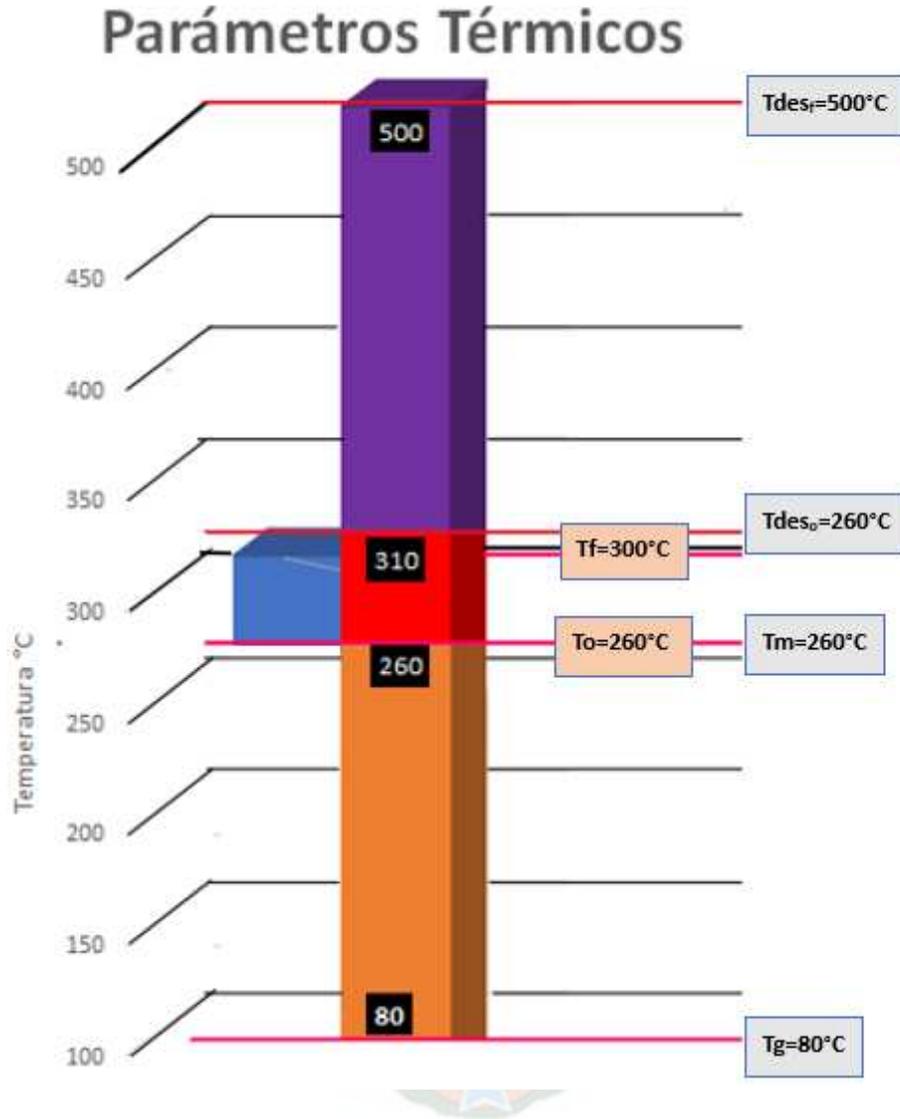
**Tabla 3 Parámetros Térmicos fibras poliéster RPET.**

Parámetro térmico	Valor (°C)
Temperatura de Transición Vítrea. (Tg)	80
Temperatura de Fusión. (Tm)	260
Temperatura de degradación. (Tdeg)	280-310
Temperatura de descomposición. (Tdes)	310-500
Temperatura de conformado (T)	260-300

Fuente: (Zhang X. , 2014)

Con estos valores podemos esquematizar gráficamente los parámetros térmicos como se ilustra en la Imagen 28.

**Imagen 28 Parámetros Térmicos**



Fuente: Elaboración Propia.

### **2.2.7. CARACTERÍSTICAS DE UNA FIBRA PET.**

Las características de las fibras textiles que se van a estudiar son las siguientes:

#### **2.2.7.1. Finura o Diámetro de finura (F).**

Según (Carrera Gallissà, 2017) la finura de las fibras se expresa como diámetro aparente o bien como masa lineal, su clasificación se detalla en la Tabla 4:

Tabla 4 Finura de fibra

Tipo de Fibra	Finura en Micras ( $\mu m$ )
Algodón	11-12
Coco	12-25
Lino	12-25
Ramio	25-60 (habitualmente: 25-30)
Cáñamo	16-50 (habitualmente 25)
Yute	17-20
Sisal	200-400
Lana	10-70 (habitualmente 16-40)
Alpaca	23-70 (habitualmente 23-30)
Llama	28-41
Camello (Vello interior)	10-30
Camello (Vello exterior)	30-120
Mohair	23-38
Cachemira	13-16 (no más de 19)
Angora	14-16
Vicuña	12-15
Seda natural	10-13
Fibras químicas	Microfibras: alrededor de 10 micras
Fibras químicas	Nanofibras: 0,5

Fuente: (Carrera Gallissà, 2017)

La finura de las fibras químicas (Imagen 29) se pueden medir utilizando la unidad llamada "tex", que representa el peso en gramos de una longitud de fibra de 1,000 metros, esta ecuación es en función de la densidad (Carrera Gallissà, 2017):

$$F(tex) = \frac{\pi * \rho * (F(\mu m))^2}{4} * 10^3$$

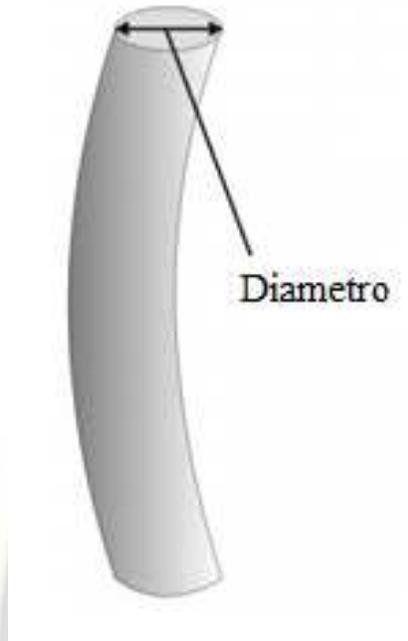
Donde:

$F(tex)$  es la finura en tex

$F(\mu m)$  es la finura en micras.

$\rho(\frac{gr}{cm^3})$  densidad de la fibra

**Imagen 29 Diámetro de finura una fibra.**



Fuente: (Guerra, 2021)

La finura de las fibras es una característica esencial de su geometría, y desempeña un papel crucial en diversas propiedades que afectan tanto el rendimiento como el valor económico de las fibras. El grosor de las fibras influye significativamente en la rigidez a la flexión, lo que a su vez impacta en la textura de los hilados y tejidos resultantes. Fibras más gruesas tienden a producir tejidos con una sensación más rígida, mientras que las fibras más finas proporcionan una textura más suave y sedosa debido a su mayor flexibilidad. En consecuencia, las fibras finas contribuyen a la creación de tejidos con una caída más pronunciada debido a su menor rigidez en la flexión (Carrera Gallissà, 2017).

#### **2.2.7.2. Extremo más grueso(CEM).**

Extremo más grueso: La parte más ancha de una fibra es su extremo más grueso. Este detalle puede influir en la durabilidad del tejido y su resistencia al desgaste. Si las fibras tienen extremos más gruesos, el tejido tiende a ser más resistente a la abrasión y más duradero en situaciones donde se somete a un uso intensivo, como en la fabricación de uniformes o bolsas resistentes (Elivira, 2005).

### Imagen 30 Microscopia fibra PET

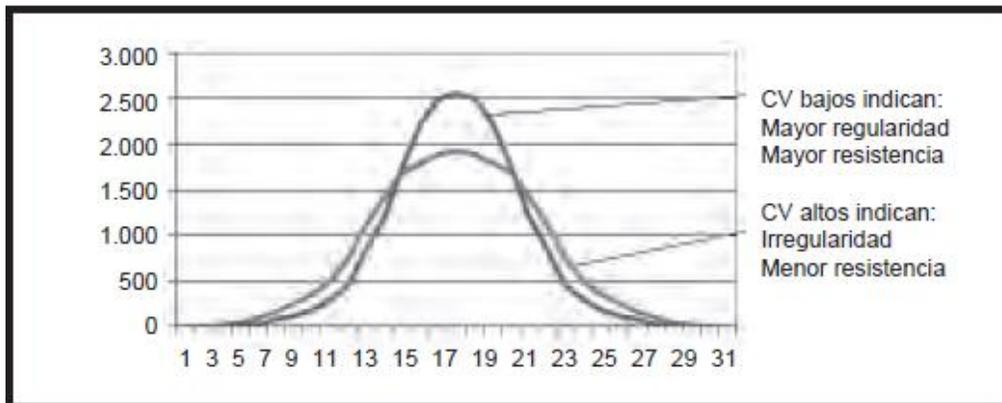


Fuente: Elaboración propia.

#### 2.2.7.3. Coeficiente de variación del diámetro de las fibras.

Este coeficiente refleja la uniformidad del grosor de las fibras en un material textil como se ve en la Imagen 31. Un bajo coeficiente de variación indica que las fibras son consistentes en términos de diámetro, lo que es importante para lograr un tejido uniforme y de alta calidad. La variabilidad en el grosor de las fibras puede resultar en imperfecciones en la superficie del tejido y problemas en la fabricación. (Elivira, 2005)

#### Imagen 31 Coeficiente de variación de fibras textiles.

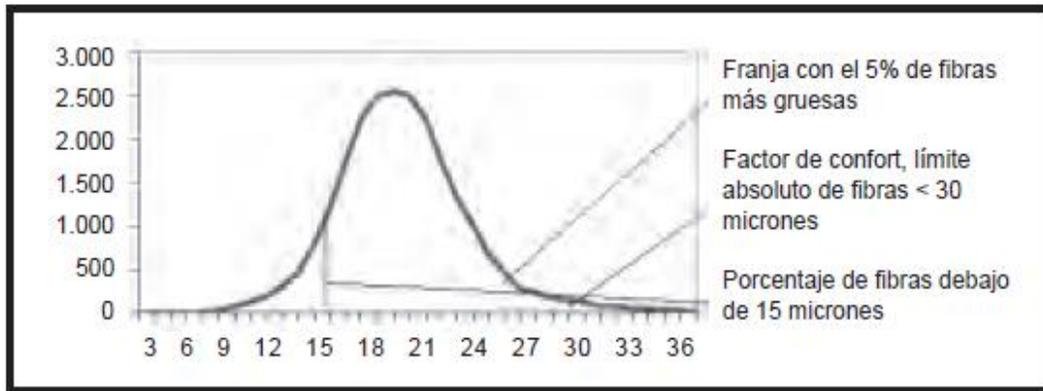


Fuente: (Elivira, 2005)

#### 2.2.7.4. Factor confort.

El factor de confort Imagen 32 se refiere a cómo se siente el tejido en contacto con la piel. Las fibras suaves, ligeras y transpirables suelen proporcionar un mayor nivel de comodidad para el usuario. Esto es esencial en la confección de ropa interior, ropa de cama y prendas de uso diario, donde la sensación de comodidad y bienestar es crucial (Chavez Cruz, 2022).

**Imagen 32 Factor confort**



Fuente: (Elivira, 2005)

#### 2.2.7.5. Giro de la finura.

El giro de la finura, o torsión de las fibras, tiene un impacto significativo en la resistencia del tejido y su capacidad para mantener su forma. Un mayor giro puede resultar en un tejido más fuerte y resistente a la deformación, pero también puede influir en su rigidez. La torsión se controla cuidadosamente durante la producción para lograr el equilibrio adecuado según las necesidades del producto final (Elivira, 2005).

#### 2.2.7.6. Curvatura de fibra

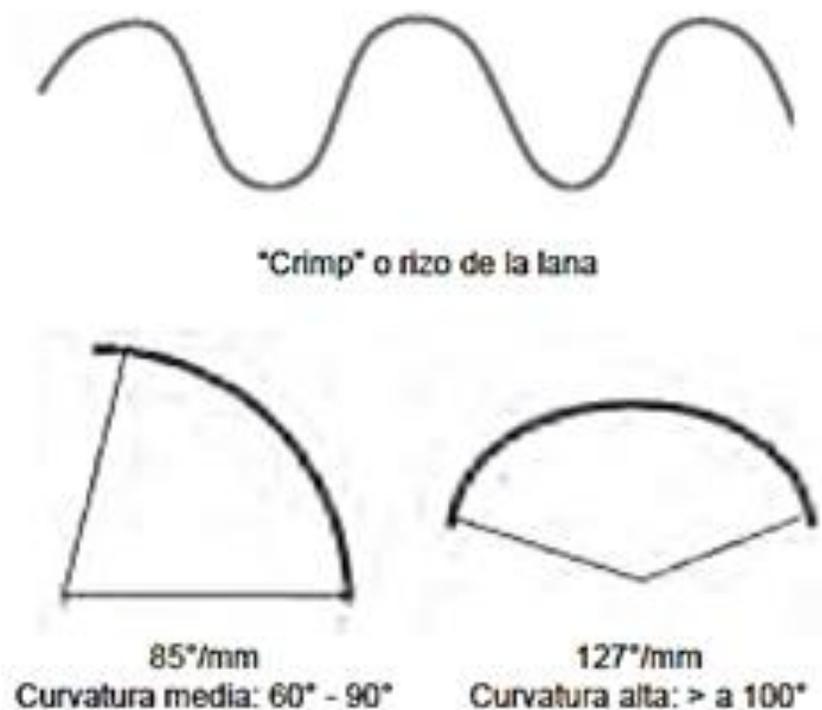
La curvatura de fibra como se ve en la Imagen 33 es una medida que indica el grado de flexión en grados por milímetro, con valores típicos oscilando entre 1 grado/mm y 100 grados/mm. Esta característica está directamente relacionada con la voluminosidad de la fibra, su capacidad de recuperación tras la compresión y, en consecuencia, su capacidad de proporcionar aislamiento térmico (Carrera Gallissà, 2017).

La evaluación de la curvatura se realiza en una porción de 200 micrómetros de un fragmento de fibra y se expresa en grados por milímetro ( $\frac{deg}{mm}$ ). En este contexto, una fibra completamente recta tendría una curvatura de  $0 \frac{deg}{mm}$ . En la medición, se considera un fragmento de fibra de 1 mm de longitud, y el ángulo A, expresado en grados, determina la curvatura ( $A \frac{deg}{mm}$ ). La resolución de la

medición es de  $1 \frac{deg}{mm}$ , y la curvatura media y la desviación estándar se calculan a  $0,1 \frac{deg}{mm}$  (Carrera Gallissà, 2017).

La técnica OFDA utilizan este método para medir la curvatura de la fibra, si bien las diferencias en la presentación de la fibra pueden resultar en mediciones distintas. La precisión de la medición de la curvatura está fuertemente influenciada por la preparación adecuada de la muestra (Carrera Gallissà, 2017)..

### Imagen 33 Curvatura de fibra



Fuente: (Elivira, 2005)

#### 2.2.7.7. Densidad aparente( $\rho$ )

La densidad aparente es una medida de cuán compacto o esponjoso es un material textil. Una densidad alta puede dar como resultado tejidos más resistentes y rígidos, ideales para aplicaciones industriales, mientras que una baja densidad se utiliza en textiles suaves y livianos como las gasas, la densidad puede ser medida con diversos ensayos (Imagen 34).

**Imagen 34 Ensayo de densidad**



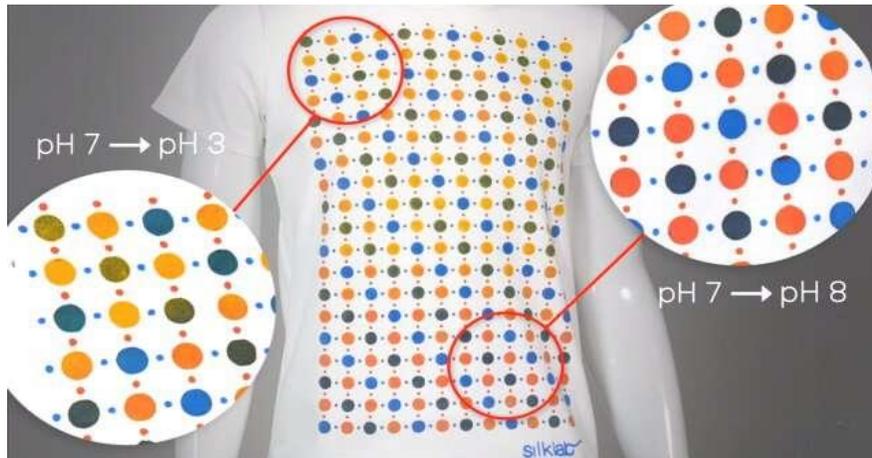
Fuente: Elaboración propia.

#### **2.2.7.8. Potencial de hidrógeno (pH)**

El pH es un factor crítico en los procesos de teñido y acabado de los materiales textiles. Un pH incorrecto puede afectar los colores, la solidez del color y las propiedades de las fibras, lo que resulta en productos textiles de calidad inferior. El control preciso del pH es esencial en la industria textil (Imagen 35) para garantizar resultados de alta calidad y la uniformidad de color (Forero Villarraga, 2023).

Según (Forero Villarraga, 2023). el valor de pH en las fibras textiles se identifica para comprobar el contenido de ácidos que pueden quedar en los tejidos aumentando el riesgo de hacer contacto directo con la piel. Para que el pH de la fibra no llegue a afectar la piel de las personas, el indicador debe estar entre una acidez débil o neutralidad.

### Imagen 35 Identificación de pH en textiles



Fuente: (Techxplore, 2020)

#### 2.2.7.9. Gramaje

El gramaje se refiere al peso de un metro cuadrado de tejido que se puede medir con ensayos de caracterización en una balanza analítica (Imagen 36). Un mayor gramaje indica un tejido más denso y, por lo tanto, generalmente más resistente y duradero. Esta propiedad es especialmente relevante en la selección de tejidos para aplicaciones donde la resistencia y la durabilidad son esenciales, como en la fabricación de tiendas de campaña y prendas de protección (Forero Villarraga, 2023).

### Imagen 36 Ensayos de gramaje



Fuente: Elaboración Propia.

#### **2.2.7.10. Humedad relativa.**

Según (Forero Villarraga, 2023) el rendimiento tanto en la capacidad de absorción como en la disipación de humedad de la fibra es de gran relevancia, ya que el cuerpo humano continuamente expulsa agua y secreciones al exterior. Es fundamental que las fibras textiles garanticen comodidad al adherirse al cuerpo, los ensayos para medir la humedad relativa son realizados con una mufla a 100° C durante una hora como se aprecia en la Imagen 37 .

**Imagen 37 Ensayo de humedad relativa.**



Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de estos parámetros es esencial en la fabricación y selección de materiales textiles. Comprenderlos a fondo permite a los diseñadores, fabricantes y consumidores elegir y utilizar materiales textiles que se adapten a sus necesidades específicas en términos de calidad, comodidad y durabilidad. La elección adecuada de las fibras y su control durante el proceso de fabricación son elementos fundamentales para garantizar que los productos textiles cumplan con los estándares de calidad y rendimiento requeridos.

#### **2.2.8. FIELTRO HÚMEDO-WET FELTING**

Según (Marchant, 2017) El fieltro en húmedo(WET FELTING) es una técnica de fabricación de textiles que consiste en entrelazar fibras textiles mediante la aplicación de agua y presión como se muestra en la Imagen 38.

Este proceso se basa en los principios de la tensión superficial, la capilaridad y la fricción.

**Imagen 38 Fibra RPET fieltro en húmedo.**



Fuente: Elaboración propia.

#### **2.2.8.1. Tensión Superficial**

La tensión superficial es la fuerza que actúa en la superficie de un líquido, en este caso, el agua. En el fieltro en húmedo, la tensión superficial del agua es esencial para atraer las fibras textiles. Cuando las fibras se exponen al agua, esta tensión superficial tiende a reducir la superficie del agua, lo que lleva a que las fibras se vean atraídas y se acerquen unas a otras. Esta atracción facilita el proceso de entrelazado, ya que las fibras buscan minimizar la superficie del agua al unirse. (Marchant, 2017)

#### **2.2.8.2. Capilaridad**

La capilaridad es el fenómeno por el cual un líquido asciende por un tubo delgado debido a las fuerzas adhesivas y cohesivas entre las moléculas del líquido y las del material del tubo. En el contexto del fieltro en húmedo, la capilaridad permite que el agua sea absorbida por las fibras textiles. Esta absorción de agua a lo largo de las fibras aumenta la humedad en el material, facilitando la deformación de las fibras y su entrelazado. La capilaridad contribuye a la uniformidad del proceso al asegurar que la humedad se distribuya de manera efectiva en toda la estructura de las fibras. (Marchant, 2017)

#### **2.2.8.3. Fricción**

La fricción entre las fibras es otro componente clave del fieltro en húmedo. La fricción es la resistencia al movimiento relativo entre dos objetos en contacto. En este contexto, la fricción entre

las fibras textiles promueve su unión. Cuando las fibras están húmedas, la fricción facilita el proceso de entrelazado al resistir su separación y promover la cohesión entre ellas. Este fenómeno es fundamental para la formación de una estructura textil compacta y resistente. (Marchant, 2017)

## **2.2.9. MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA RPET**

Según (Alkadasi & Asim, 2021) los materiales compuestos con fibras de polietileno tereftalato reciclado (RPET) están ganando popularidad en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades mecánicas mejoradas y su contribución a la sostenibilidad ambiental. La inclusión de fibras RPET en matrices poliméricas como la resina poliéster y el poliuretano permite la creación de materiales con características específicas que satisfacen una variedad de necesidades industriales.

### **2.2.9.1. Materiales compuestos**

Los materiales compuestos son aquellos formados por dos o más componentes distintos que cuando se combinan generan un material con distintas propiedades. Este concepto es fundamental en la ciencia de los materiales y se emplea en aplicaciones industriales. En el caso de los materiales compuestos con fibras de polietileno tereftalato reciclado (RPET), los componentes principales son las fibras RPET y una matriz polimérica (Alkadasi & Asim, 2021).

Las propiedades superiores de los materiales compuestos con RPET se derivan de la sinergia entre las fibras y la matriz. Las fibras RPET proporcionan resistencia y rigidez, mientras que la matriz polimérica actúa como un aglutinante que mantiene unidas las fibras y distribuye las cargas aplicadas al material compuesto. Esta combinación permite diseñar materiales con una alta resistencia a la tracción, una excelente rigidez y una buena durabilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones en la industria automotriz, la construcción, y otros sectores donde se requieren materiales ligeros y resistentes (Alkadasi & Asim, 2021).

### **2.2.9.2. Matrices Poliméricas**

Las matrices poliméricas en los materiales compuestos con RPET pueden ser de diferentes tipos, incluyendo resinas poliéster y poliuretano. La matriz actúa como un aglutinante que mantiene unidas las fibras y distribuye las cargas aplicadas al material compuesto (Alkadasi & Asim, 2021).

**Resinas Poliéster:** Son ampliamente utilizadas debido a su buen equilibrio entre costo y rendimiento. Las resinas poliéster tienen una buena adhesión a las fibras RPET y proporcionan una buena resistencia química y a la intemperie. Esto hace que los materiales compuestos con resina poliéster y fibras RPET sean adecuados para aplicaciones exteriores y en ambientes agresivos (Alkadasi & Asim, 2021).

**Poliuretano:** Ofrece una mayor flexibilidad y elasticidad comparado con las resinas poliéster. Los materiales compuestos con poliuretano y fibras RPET pueden ser diseñados para aplicaciones donde se requiere una alta absorción de impactos y una buena amortiguación. Además, el

poliuretano puede ser formulado en versiones rígidas o flexibles, lo que permite una gran versatilidad en el diseño de materiales compuestos (Alkadasi & Asim, 2021).

La matriz polimérica no solo actúa como un aglutinante que mantiene unidas las fibras, sino que también distribuye las cargas aplicadas a lo largo del material compuesto. Esto es crucial para asegurar que las propiedades mecánicas del compuesto sean uniformes y que las fibras RPET puedan contribuir eficazmente a la resistencia y rigidez del material. En el diseño de materiales compuestos, la elección de la matriz y su compatibilidad con las fibras RPET son factores críticos que determinan el rendimiento y la durabilidad del material final (Alkadasi & Asim, 2021).

### 2.2.10. PROCESO PARA EL RECICLADO DE FIBRA PET.

Según (GUERRA VACA, 2021) en su proyecto de investigación y desarrollo, presenta dos alternativas para el hilado de la fibra, extrusión, y por centrifugado. Así el autor realiza una comparación de ambas alternativas aseverando que el hilado por centrifugado es el más económico.

**Imagen 39** Etapas de proceso de reciclaje de botellas PET para la producción de fibra corta de RPET.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Imagen 39 una vez recolectado, clasificado, lavado, secado y triturado el PET, se obtiene hojuelas de este material que luego es fundido para que a través de un sistema de centrifugado se produzca el proceso de hilatura, donde se transforma el PET en filamento, es decir, en la fibra textil. (Guerra, 2021).

## CAPITULO III

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

La presente investigación responde a un diseño experimental puro, puesto que se creará una situación de control, donde se manipularán las variables independientes, para analizar las consecuencias de dicha manipulación sobre una dependiente.

Se tomará una muestra de fibra RPET, para caracterizar sus propiedades y ver los cambios al manipular la variable independiente (Temperatura de conformado).

Las técnicas utilizadas son de carácter experimental, donde se utilizará muestras, que serán medidas de forma sistemática a partir del uso de instrumentos como el microscopio, balanza analítica, pH metro, vernier, picnómetro, cronómetro y pirómetro.

#### 3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1. OPERATIVIZACIÓN DE VARIABLES.

Las variables de la presente investigación se expresan en la Tabla 5.

**Tabla 5 Operativización de variables.**

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
<b>Variable independiente.</b>		
Temperatura de conformado. ( <i>T</i> )	La temperatura del proceso de conformado programado en el prototipo.	Instrumento: Pirómetro del equipo. Medición: Al inicio del proceso. Valores: 260°C-300°C
Condición. Chorro de aire. ( <i>CC/SC</i> )	Flujo de aire durante el proceso de conformado.	Instrumento: Sopladora de aire. Medición: Durante el proceso. Valores: Con chorro/Sin chorro.
<b>Variables dependiente.</b>		
Finura. ( <i>F</i> )	Medida del diámetro de la fibra.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores 15 $\mu$ m – 30 $\mu$ m
Extremo más grueso. ( <i>CEM</i> )	Medida de la variabilidad del diámetro de las fibras de lana dentro de una mecha.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores 15 $\mu$ m – 40 $\mu$ m
Coefficiente de variación del diámetro de las fibras.( <i>CV</i> )	Medida de la variabilidad de la distribución de diámetros de las fibras.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores 60% – 100%
Factor confort ( <i>CF</i> )	Medida de la comodidad de la fibra.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores 60% – 100%

Giro de la finura (GF)	Medida de la cantidad de fibras necesarias para producir un hilo de un peso determinado.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores $20\mu m - 45\mu m$
Curvatura de la fibra (CU)	Medida del grado de curvatura o rizo de las fibras.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores $40\frac{deg}{mm} - 70\frac{deg}{mm}$
Porcentaje de curvatura (%CU)	Medida del porcentaje de curvatura en la muestra de fibra.	Instrumento: OFDA 4000 Medición: Al final de la producción. Valores 60% – 90%
Densidad aparente. ( $\rho$ )	Relación entre la masa y el volumen aparente de la fibra.	Instrumento: Kit de densidad (Balanza analítica). Medición: Al final de la producción. Valores $1,34\frac{g}{cm^3} - 1,39\frac{g}{cm^3}$
Potencial de hidrogeno. (pH)	Medida de acides o alcalinidad de la fibra.	Instrumento: Phmetro digital. Medición: Al final de la producción. Valores 2-7.
Gramaje. (G)	Peso en gramos por centímetro cuadrado de la fibra corta no tejida.	Instrumento: Balanza analítica. Medición: Al final de la producción. Valores $1\frac{g}{cm^2} - 3\frac{g}{cm^2}$
Humedad relativa (Hr)	Humedad relativa de la fibra.	Instrumento: Balanza analítica. Medición: Al final de la producción. Valores 0% – 0,5%
<b>Variables intervinientes</b>		
Velocidad angular del equipo. ( $\omega$ )	La velocidad angular de rotación centrifuga.	Instrumento: Tablero del equipo. Medición: Durante todo el proceso de producción. Valores 2850 rpm
Diámetro de abertura del cabezal. ( $D_C$ )	Abertura del cabezal en el plato, propio del equipo.	Instrumento: Vernier. Medición: Al inicio de la producción. Valores $25\mu m$
Distancia del hilado. ( $D_H$ )	Distancia entre el equipo y el colector.	Instrumento: Cinta métrica. Medición: Al inicio de la producción. Valores 1,5m
Masa de la materia prima. ( $m_{MP}$ )	Masa de RPET de ingreso al equipo.	Instrumento: Balanza. Medición: Al inicio de la producción. Valores 200g capacidad del equipo.

Fuente: Elaboración Propia.

### **3.1.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

Este estudio emplea un método de investigación experimental, donde la realización de pruebas se llevará a cabo en un entorno de laboratorio controlado para evaluar de manera precisa las relaciones entre la temperatura de conformado y las propiedades de la fibra.

### **3.1.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación que se lleva a cabo se enfoca en un tipo de investigación causal, específicamente con un énfasis en la explicación de los fenómenos. Este enfoque se basa en entender cómo la variación intencional de la temperatura afecta directamente a las características de la fibra RPET.

Donde se busca establecer una relación de causa y efecto entre dos variables: en este caso, la temperatura de conformado y las propiedades de la fibra RPET.

### **3.1.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO**

La población de estudio está conformada por las fibras de tereftalato de polietileno reciclado (RPET) que se obtienen mediante el proceso de hilado centrífugo fundido en condiciones controladas de temperatura de conformado. Se seleccionarán muestras representativas de fibras RPET producidas en estas condiciones.

### **3.1.5. INSTRUMENTOS Y MEDICIÓN.**

Se utilizaron la siguiente instrumentación:

#### **3.1.5.1. Sistema OFDA (*Optical-based Fibre Diameter Analyser*)**

Según (Carrera Gallissà, 2017) El sistema es un microscopio óptico, está equipado con una plataforma móvil de portaobjetos motorizada que realiza un escaneado de las fibras en la preparación. Este dispositivo digitaliza las imágenes y determina el ancho de las fibras mediante el análisis de píxeles en las imágenes obtenidas. Este método ofrece un ensayo rápido y sencillo capaz de medir hasta 20,000 fibras en un minuto. Es especialmente adecuado para medir la finura de la lana y pelos, aunque su aplicabilidad se extiende a otras fibras químicas de sección circular. Este sistema es el único método homologado por la International Wool Textile Organisation (IWTO).

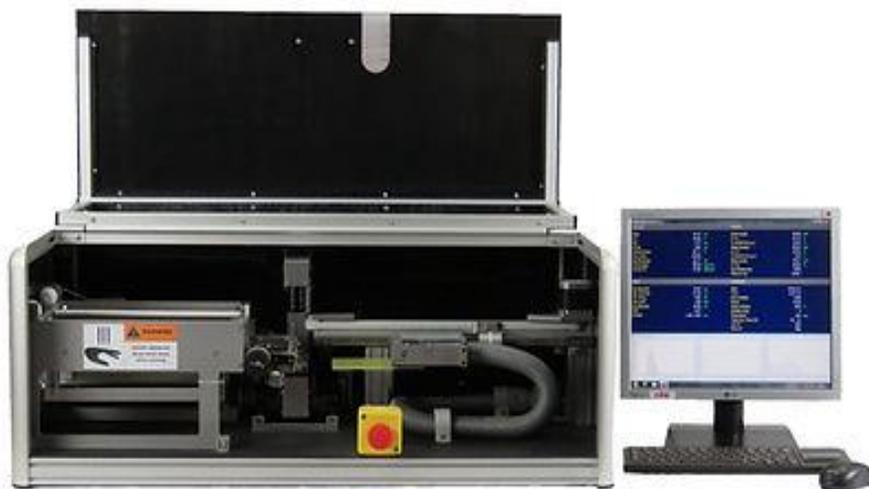
3.1.5.1.1. OFDA 4000.

Tabla 6 Ficha técnica OFDA 4000

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	OFDA 4000(Imagen 40)
<b>Reconocimiento por método de prueba</b>	IWTO TM 62
<b>Descripción</b>	<p>El análisis realizado con OFDA 4000 proporciona información detallada sobre diversas características de las fibras, permitiendo evaluar su calidad e idoneidad para diferentes usos. Los resultados clave obtenidos a partir de las pruebas realizadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia Acumulada de Longitud, Altura y Barba</li> <li>• Proporciona una visión integral de la distribución de estas dimensiones clave en las fibras.</li> <li>• Histograma de Longitud y Altura.</li> <li>• Histograma de Barba</li> <li>• Contenido de Fibra Larga</li> <li>• Media del Diámetro de Fibra</li> <li>• Curvatura de la Fibra y Distribución</li> <li>• Factor de Confort es el porcentaje de fibras (&gt;30 µm) para evaluar la comodidad del material.</li> <li>• Fibras Gruesas es la diferencia del 5% superior de fibras gruesas al diámetro medio de la fibra.</li> <li>• Resultados de Mezclas de Fibras Virtuales</li> </ul>
<b>Diámetro</b>	Rango: 4-300 µm.
<b>Longitud</b>	Rango: 5-280 mm.
<b>Precisión</b>	La precisión de las mediciones se ajusta a los estándares establecidos en IWTO TM 62.

Fuente: (OFDA, 2023)

### Imagen 40 Equipo OFDA 4000



Fuente: (OFDA, 2023)

#### 3.1.5.2. Balanza analítica de precisión.

Tabla 7 Ficha técnica Balanza Analítica ME204

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Balanza Analítica ME204.(Imagen 41)
<b>Resultados Fiables</b>	Tecnologías de pesaje probadas y fabricación de calidad por METTLER TOLEDO. Resultados uniformes y precisos.
<b>Aplicaciones</b>	Con 10 aplicaciones, la balanza es versátil y adecuada para una variedad de tareas de pesaje en laboratorios.
<b>Capacidad</b>	220 g
<b>Precisión.</b>	Hasta 0,0001g de precisión.
<b>Construcción Robusta.</b>	Base de metal, plato de pesaje de acero inoxidable y protección frente a sobrecargas para un rendimiento fiable en uso diario intenso.

Fuente: (Mettler Toledo, 2023)

### Imagen 41 Balanza Analítica ME204



Fuente: (Mettler Toledo, 2023)

### 3.1.5.3. Phmetro digital.

**Tabla 8 Medidores de pH para Laboratorio OAKTON 700.**

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Medidor de pH 700 OAKTON(Imagen 42).
<b>Descripción</b>	El Medidor de pH 700 es un equipo de escritorio versátil que mide pH, mV, mV relativo y temperatura.
<b>Resolución de pH</b>	0.01
<b>Precisión de pH</b>	± 0,01 pH
<b>Resolución de Mv</b>	0,1 o 1 Mv
<b>Detalle</b>	Medidor de sobremesa con electrodo de pH "todo en uno"

Fuente: (OAKTON, 2023)

**Imagen 42 PHmetro OAKTON pH 700**



Fuente: (OAKTON, 2023)

#### 3.1.5.4. Kit de densidad.

**Tabla 9 Ficha técnica Kit De Densidad, Solids**

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Kit De Densidad, Solids OHAUS(Imagen 43)
<b>Descripción</b>	Instrumento para medición de densidades analíticas por el principio de Arquímedes.
<b>Material</b>	Acero inoxidable.
<b>Detalle</b>	Adecuado a la balanza analítica de precisión, su medición se completa con el uso de picnómetro y termómetro.

Fuente: (OHAUS, 2023)

**Imagen 43 kit de densidades OHAUS**



Fuente: (OHAUS, 2023)

**3.1.5.5. Calibrador Vernier Digital 6" Acero Inoxidable, Std y mm**

**Tabla 10 Ficha técnica Calibrador Vernier Digital Truper**

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	El Calibrador Vernier Digital de 6" de Truper.(Imagen 44)
<b>Descripción:</b>	Instrumento de medición precisa y versátil, diseñada para medir diámetros externos, internos y profundidades. Con un cuerpo de acero inoxidable, proporciona durabilidad, permite lecturas precisas en milímetros, pulgadas y fracciones de pulgada.
<b>Material del Cuerpo</b>	Acero Inoxidable
<b>Funciones</b>	Medición de diámetros externos, internos y profundidades
<b>Tolerancia</b>	0.002" / 0.05 mm
<b>Capacidad Mínima / Máxima</b>	(0.0005" / 0.01 mm) / (6" / 150 mm)

Fuente: (Truper, 2023)

**Imagen 44 Calibrador vernier digital 6" acero inox.**



Fuente: (Truper, 2023)

### 3.1.5.6. Picnómetro Calibrado 25ml Gay Lussac

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Picnómetro Calibrado de 25 ml Gay Lussac. (Imagen 45)
<b>Descripción:</b>	Instrumento de medición preciso utilizado para determinar la densidad o peso específico de sustancias líquidas. Fabricado en vidrio borosilicato 3.3 de alta calidad, cumple con las normas ASTM 438 DIN 3507, garantizando durabilidad y precisión en las mediciones.
<b>Capacidad</b>	25 ml
<b>Norma de Referencia</b>	Gay Lussac
<b>Tolerancia</b>	$\pm 2$ ml
<b>Método de Medición</b>	Volumen concreto para determinar densidad o peso específico.
<b>Calibración</b>	Serigrafiado en el vidrio con capacidad exacta.
<b>Calibración Realizada con</b>	Agua destilada a 20 °C
<b>Tapón</b>	Vidrio, ajustable a la boca del recipiente.

Fuente: (Labcomercial, 2023)

**Imagen 45 Picnómetro calibrado 25ml**



Fuente: (Labcomercial, 2023)

### 3.1.5.7. Pirómetro digital laser

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Pirómetro digital laser DIGI-SENSE 20250-07.(Imagen 46)
<b>Descripción:</b>	Los termómetros IR miden la temperatura de la superficie de un objeto. La óptica del termómetro siente la energía emitida, reflejada y transmitida. La electrónica del termómetro traduce la información en una lectura de temperatura que se despliega en el LCD.
<b>Precisión</b>	101 °C a 500 °C 1,5 % de la lectura (213,8 °F a 932 °F) -50 °C a 100 °C 3 °C (-58 °F a 212 °F)
<b>Rango de medición</b>	-50 °C a 500 °C (-58 °F a 932 °F)
<b>Radio óptico</b>	12:1
<b>Longitud de onda</b>	635 nm

Fuente: (Test Equipment Depot, 2023)

**Imagen 46 Pirómetro digital DIGI-SENSE 20250-07 .**



Fuente: (Test Equipment Depot, 2023)

### 3.1.5.8. Sonómetro

**Tabla 11 Sonómetro Trotec SL-400.**

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Sonómetro TROTEC SL-400 (Imagen 47).
<b>Descripción</b>	El sonómetro SL-400 cumple con los requisitos de los sonómetros de clase de precisión 2 conforme a la norma IEC 61672-1, así como con ANSI S1.4, siendo óptimo para documentar el ruido de máquinas o el entorno..
<b>Rango de medición</b>	30 - 130 dB
<b>Resolución</b>	0,1 Db
<b>Rango de frecuencia</b>	31,5 Hz - 8 kHz
<b>Rango de medición parcial</b>	30 ... 80 dB (bajo) 50 ... 100 dB (medio) 80 ... 130 dB (alto) 30 ... 130 dB (auto)
<b>Tiempo de respuesta</b>	500 ms(Milisegundos)

Fuente: (Trotec, 2023)

**Imagen 47 Sonómetro digital SL-400**



Fuente: (Trotec, 2023)

**3.1.5.9. Equipo de Tracción Universal**

Característica	
<b>Nombre del Instrumento</b>	Máquina de prueba universal hidráulica WDW (Imagen 48)
<b>Descripción</b>	Realiza pruebas de tensión, compresión, flexión, cizallamiento y otras pruebas en materiales metálicos y no metálicos, cumpliendo con estándares internacionales como ISO, ASTM, DIN y GB.
<b>Cilindro Posición</b>	Bajo
<b>Carga máx. (kN)</b>	2000 kN
<b>Resolución de desplazamiento (mm)</b>	0,01
<b>Velocidad de movimiento del pistón máx. (mm/min)</b>	50
<b>Especificación</b>	750400430 mm
<b>Capacidad de Producción</b>	100 sets/Month

Fuente: (Zealchon, 2018)

**Imagen 48 Máquina de prueba universal hidráulica WDW.**



Fuente: (Zealchon, 2018)

Los datos cuantitativos recopilados se sometieron a análisis estadísticos descriptivos e inferenciales. Se utilizaron gráficos, tablas y medidas de tendencia central y dispersión para presentar los resultados de manera efectiva. Se llevaron a cabo pruebas estadísticas para identificar relaciones significativas entre la temperatura de conformado y las propiedades de las fibras RPET. Los datos cualitativos fueron analizados mediante técnicas de interpretación y triangulación para lograr una comprensión profunda de los resultados.

Con estos componentes, se estableció una base robusta para llevar a cabo el análisis comparativo de la variación de la temperatura en las propiedades de las fibras RPET durante el proceso de hilado centrífugo fundido.

## CAPITULO IV

### 4. EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

#### 4.1. MEDICIÓN Y EXPERIMENTACIÓN

##### 4.1.1. PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE FIBRA

El procedimiento técnico desarrollado para examinar cómo la temperatura de moldeo influye en las propiedades de la fibra de Tereftalato de Polietileno Reciclado (RPET) durante el proceso de hilado centrífugo fundido se estructura en fases fundamentales como detalla el flujograma de la Imagen 49.

**Imagen 49 Flujograma de operación.**



Fuente: Elaboración propia.

Fase 1: Preparación y Tratamiento de la Materia Prima.

En esta etapa inicial, se adquieren botellas PET con se observa en la Imagen 50 recicladas de distintos proveedores. La fase implica tareas clave como:

- Recepción y descarga de envases PET de proveedores.
- Confirmación de la composición del material, asegurando que sean botellas de PET y no de otros plásticos como PP, PEBD, PEAD, etc.
- Verificación de la ausencia de contaminantes como aceites, pinturas, etc.
- Aseguramiento de la ausencia de líquidos en las botellas, como agua u otros fluidos.
- Verificación de que las botellas sean de material uniforme, específicamente PET cristal (inoloro).

**Imagen 50 Recolección de botellas PET.**



Fuente: Elaboración propia.

Fase 2: Trituración de materia prima.

En esta etapa, las botellas seleccionadas se convierten en escamas mediante el uso de un equipo de trituración como se ven en la Imagen 51. Dicho equipo, con cuchillas rotatorias y fijas, tritura las botellas para obtener hojuelas.

**Imagen 51 Triturado de termoplásticos.**



Fuente: Elaboración propia.

El tamaño de las hojuelas está determinado por el diámetro de los orificios de la criba, como se muestra en la figura.

**Imagen 52 PET Triturado**

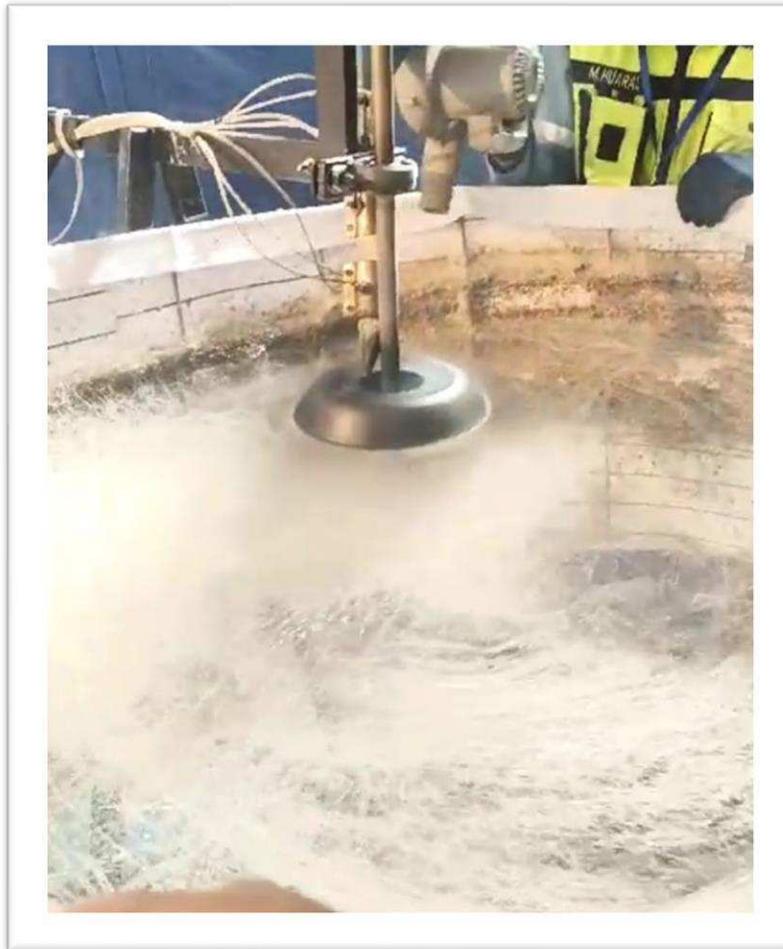


Fuente: Elaboración propia.

### Fase 3: Proceso de Hilado Centrífugo Fundido.

Las hojuelas de PET reciclado se someten al conformado por hilado centrífugo fundido para obtener fibras. La solución polimérica se centrifuga, expulsando el chorro polimérico del cabezal giratorio. Este chorro se estira, enfría y se deposita en el colector, formando fibras solidificadas donde se modifica las dos condiciones de flujo de aire, con chorro (CC) y sin chorro (SC). Este paso crucial implica la variación de la temperatura de conformado para evaluar su impacto en las propiedades finales de la fibra RPET.

#### **Imagen 53 Hilado Centrífugo fundido con chorro de aire.**



Fuente: Elaboración propia.

### Fase 4: Caracterización de fibra RPET.

La fibra RPET se clasificó según se observa en la Imagen 54, considerando su temperatura y la condición del flujo de aire.

### Imagen 54 Clasificación de fibras RPET



Fuente: Elaboración propia.

Se llevaron a cabo diversos ensayos para caracterizar la fibra RPET con el fin de estudiar las propiedades definidas en la Tabla 5, que contiene las variables dependientes. Posteriormente, se aplicaron diferentes análisis de datos.

#### Fase 5: Aplicación de la fibra RPET

En la aplicación de la fibra RPET, se identifican dos escenarios probables: en la industria textil como fibra textil y en la industria de la construcción como material de aislamiento térmico acústico.

Para su utilización en la industria textil, se analizaron los datos obtenidos en los ensayos de caracterización esto para las fibras conformadas con chorro de aire.

Para su implementación en la industria de la construcción, se llevó a cabo un proceso de fieltro en húmedo esto para las fibras sin chorro de aire.

#### 4.1.1.1. Proceso de conformado por fieltro en húmedo de fibra

El proceso de fieltro en húmedo se puede dividir en cuatro etapas:

Colocación de las fibras: Las fibras textiles se colocan en capas, creando una malla suelta de fibras entrelazadas. Las fibras se pueden colocar en una bandeja, un molde o un bastidor(Imagen 55).

**Imagen 55 Bastidor para prensado.**



Fuente: Elaboración propia.

Aplicación de agua y presión: Se aplica agua sobre las capas de fibras y se aplica presión. El agua actúa como un agente aglutinante, y ayuda a que las fibras se entrelacen y se compacten. La presión se puede aplicar a mano, con una prensa como se ve en la Imagen 56.

**Imagen 56 Prensado de fibra.**



Fuente: Elaboración propia.

Secado: Una vez que las fibras están bien unidas, el material se deja secar. El secado se puede realizar al aire libre o en un horno.

#### 4.1.1.2. Caracterización de fibra conformado por fieltro en húmedo

Una vez realizado el conformado de la fibra mediante fieltro en húmedo, se llevaron a cabo dos ensayos de caracterización:

- Coeficiente de reducción de ruido(NRC)

Según (Gumiel Rivera, 2021), el coeficiente de reducción se mide con la siguiente formula:

$$NRC = \frac{\sum SAC}{n}$$

Donde:

SAC= Coeficiente de absorción sonora.

n= Número de frecuencias Estudiadas.

- Resistencia Térmica (R)

Según (Reinozo Salinas, 2018), la resistencia térmica R fibras se mide con la siguiente formula:

$$R = \frac{e}{kA}$$

Donde:

e= Espesor.

A= Área.

K=Conductividad Térmica.

- Ensayo de tracción

Según (Callister, 2021) el ensayo de tracción consiste en aplicar una carga uniaxial a una probeta del material hasta su fractura. Durante el ensayo, se mide la fuerza aplicada y el alargamiento de la probeta, lo cual permite determinar varias propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la elongación a la rotura.

En los polímeros, el ensayo de tracción es crucial para evaluar su comportamiento bajo fuerzas. Los polímeros pueden exhibir comportamientos viscoelásticos, donde las propiedades mecánicas dependen del tiempo y la tasa de carga. El ensayo de tracción ayuda a identificar estos comportamientos y a diseñar polímeros que sean adecuados para aplicaciones específicas.

Para los materiales compuestos, el ensayo de tracción permite evaluar la interacción entre la matriz y las fibras de refuerzo. Las propiedades mecánicas de los compuestos dependen tanto de las propiedades individuales de la matriz y las fibras como de la calidad de la adhesión entre ellos. Los ensayos de tracción ayudan a optimizar las formulaciones de materiales compuestos para mejorar su rendimiento en aplicaciones específicas (Oxford University Press, 2006).

#### 4.1.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS RPET.

Los ensayos de caracterización empleados son detallados a continuación:

##### 4.1.2.1. Potencial de hidrogeno(pH)

**Normativa:** TS EN ISO 3071 textil- Determinación de pH en extracto acuoso.

**Documento referencial:** Pruebas fisicoquímicas a la fibra de poliéster (Forero Villarraga, 2023)

##### **Procedimiento:**

- Preparación del Agua Destilada:
  - Calentar agua destilada hasta alcanzar su punto de ebullición (89 °C).
  - Observar el proceso de calentamiento en un vaso precipitado.
- Inmersión de la Fibra:
  - Después de alcanzar el punto de ebullición, tomar una muestra de la fibra.
  - Sumergir la muestra de fibra en el agua destilada caliente durante 10 minutos.
  - Observar la fibra sumergida en el vaso precipitado.
- Retiro de la Fibra:
  - Pasados los 10 minutos, retirar la fibra del agua destilada.
  - Preparar la fibra para la medición de pH.
- Medición de pH(Imagen 57):
  - Realizar la medición de pH en la fibra retirada.
  - Observar el resultado de la medición-
- Replicación del Proceso:
  - Repetir los pasos 1-4 para asegurar resultados consistentes.

**Imagen 57 Medición de pH**



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2.2. Densidad aparente ( $\rho$ )

**Normativa:** ISO 1183-1:2019 Plastics Methods for determining the density of non-cellular plastics.

**Documento referencial:** Protocolos para caracterización de no tejidos conformados por nanofibras y microfibras. (Universidad Pontificia Bolivariana, 2019)

#### **Procedimiento:**

- Medición de la Densidad del Medio Líquido:
  - Utilizar un picnómetro y una balanza analítica.
  - Llenar el picnómetro con el medio líquido cuya densidad se va a medir.
  - Medir la masa del picnómetro lleno del medio líquido en la balanza analítica.
  - Registrar la masa y calcular la densidad del medio líquido.
- Medición de la Temperatura del Medio:
  - Utilizar un termómetro para medir la temperatura del medio líquido.
  - Registrar la temperatura para considerar las variaciones térmicas en la densidad.
- Armado del Kit de Densidad en la Balanza Analítica:
  - Configurar la balanza analítica y asegurarse de que esté correctamente calibrada.
  - Verificar que todos los componentes del kit estén en su lugar y en condiciones adecuadas.
- Pesado del Sistema sin Muestras:
  - Colocar el kit de densidad en la balanza analítica.
  - Registrar la masa del sistema sin la presencia de muestras o polímero.
- Introducción del Polímero al Sistema (Imagen 58):
  - Asegurarse de que el polímero esté completamente seco.
  - Introducir cuidadosamente el polímero al sistema en la balanza analítica.
  - Verificar que el polímero no flote y esté completamente sumergido en el medio líquido.
- Medición en el Sistema de Kit de Densidad y Balanza de la Masa de la Muestra:
  - Realizar cuatro mediciones de la masa del sistema con el polímero.
  - Registrar cada medición y calcular el promedio de las cuatro masas obtenidas.

### Imagen 58 Medición de la densidad aparente.



Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo de la Densidad del Sólido:
  - Utilizar la fórmula de densidad:

$$Ds = \left[ \frac{A}{P} \right] * d$$

Donde:

Ds= Densidad relativa.

A=Promedio de la masa del solido en el líquido.

P=Masa del líquido.

d=Densidad del líquido.

#### 4.1.2.3. Gramaje.

**Normativa:** ISO 29073-1: 1992. Determination of Mass per Unit Area.

**Documento referencial:** Protocolos para caracterización de no tejidos conformados por nanofibras y microfibras. (Universidad Pontificia Bolivariana, 2019)

### Procedimiento:

- Acondicionamiento del No Tejido:
  - Colocar el no tejido en la atmósfera estándar de ensayo, siguiendo las condiciones descritas en la norma NTC 378 (temperatura de 23 °C y humedad relativa de  $50 \pm 2\%$ ).
  - Mantener el no tejido en estas condiciones ambientales durante 2 horas para garantizar su estabilización.
- Preparación de Piezas de Ensayo(Imagen 59):
  - Trazar al menos tres y hasta cinco piezas de ensayo en el no tejido.
  - Cada pieza debe tener un área mínima de 100 cm<sup>2</sup> (10 x 10 cm).
  - Cortar las piezas con un troquel o bisturí para asegurar medidas precisas.

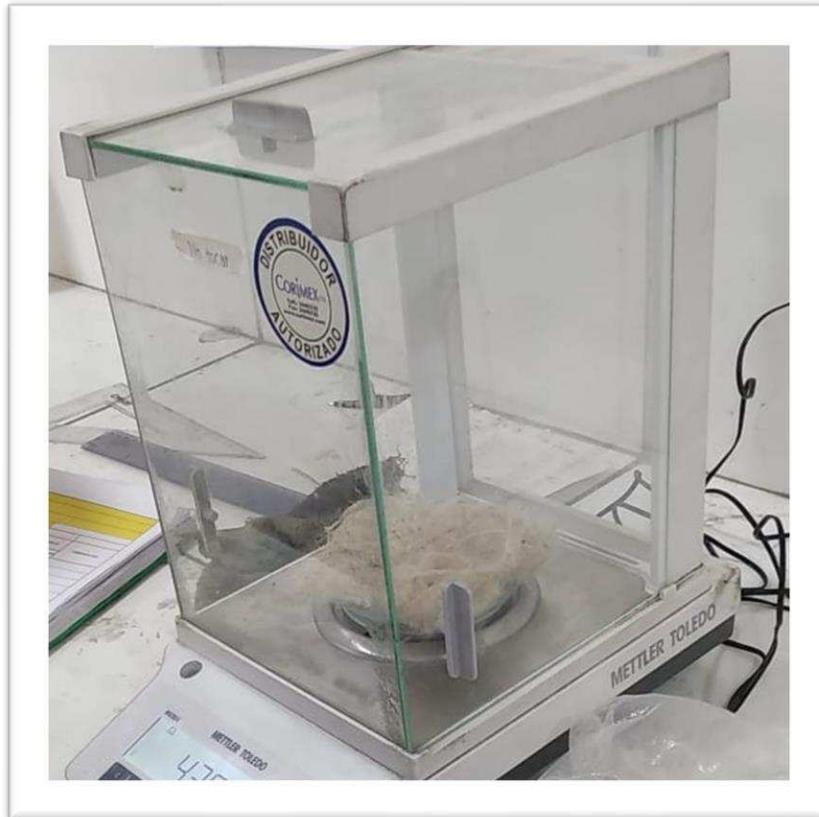
**Imagen 59 Probetas cortadas para gramaje.**



Fuente: Elaboración propia.

- Medición de la Masa de Cada Pieza(Imagen 60):
  - Utilizar una balanza analítica para determinar la masa de cada pieza de ensayo por separado.
  - Registrar las masas individuales de cada pieza con la mayor precisión posible.
- Acondicionamiento del No Tejido:

## Imagen 60 Pesaje de Probetas



Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de Resultados:
  - Calcular el promedio de las masas individuales obtenidas.
- Cálculo del Gramaje (Peso por Unidad de Área):
  - Utilizar el área de cada pieza ( $100 \text{ cm}^2$ ) para calcular el gramaje en ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).
  - Aplicar la fórmula:

$$G = \left[ \frac{m}{Ar} \right]$$

Donde:

G= Gramaje.

m=Masa de la fibra.

Ar=Área de la fibra.

#### 4.1.2.4. Humedad relativa

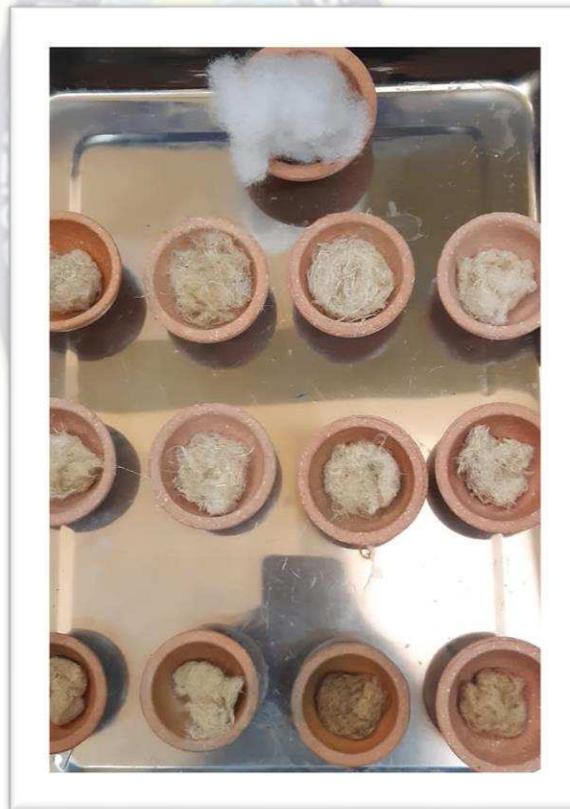
**Normativa:** ISO 3801:1977 Textiles Woven fabrics

**Documento referencial:** Pruebas fisicoquímicas a la fibra de poliéster (Forero Villarraga, 2023)

#### **Procedimiento:**

- Secado de la Fibra(Imagen 61):
  - Colocar la fibra textil en un secador calibrado a 100 °C durante una hora para eliminar restos de humedad.
  - Verificar que el secador esté debidamente calibrado para garantizar la precisión de la temperatura.

**Imagen 61 Muestras para humedad relativa.**



Fuente: Elaboración propia.

- Pesado de la Fibra Seca:
  - Después del proceso de secado, transferir la fibra a un vidrio reloj.
  - Llevar el vidrio reloj con la fibra a una balanza analítica y registrar el peso de la fibra completamente seca.

- Registro de Pesos:
  - Registrar los pesos obtenidos en la tabla de resultados para su posterior análisis.
  - Cálculo del Porcentaje de Humedad:

$$\%Hr = \left( \frac{mh - ms}{mh} \right) * 100$$

Hr= Humedad Relativa.

mh= masa húmeda.

Ms=Masa seca.

**4.1.2.5. Finura( $F$ ), porcentaje en finura en muestra( $\%F$ ), coeficiente de variación( $CV$ ), extremo más largo ( $CEM$ ), factor confort( $FC$ ), Giro de finura( $GF$ ), curvatura de la finura( $CU$ ) y porcentaje de curva( $\%CU$ ).**

**Normativa:** IWTO TM 62 Determination of Fibre Length Distribution, Mean Fibre Diameter and fibre Diameter Distribution of Wool Top & Slivers by the OFDA-4000

**Documento referencial:** Física textil, propiedades físicas para caracterizar la calidad de las fibras textiles. (Carrera Gallissà, 2017)

Los ensayos de Finura( $F$ ), porcentaje en finura en muestra( $\%F$ ), coeficiente de variación( $CV$ ), extremo más largo ( $CEM$ ), factor confort( $FC$ ), Giro de finura( $GF$ ), curvatura de la finura( $CU$ ) y porcentaje de curva( $\%CU$ ), se realiza mediante un procedimiento estandarizado que asegura consistencia y precisión.

**Procedimiento:**

- Preparación de la Muestra(Imagen 62):
  - Se corta la fibra en retazos para asegurar una representación adecuada de la muestra.

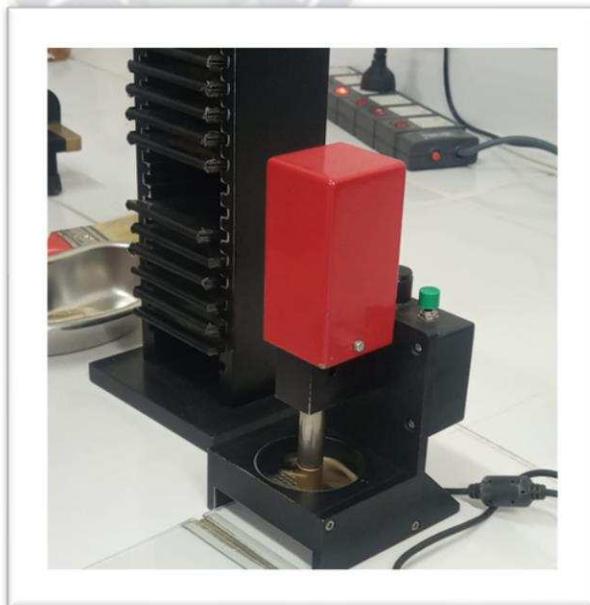
**Imagen 62 Preparación de muestras.**



Fuente: Elaboración propia.

- Reducción de Fibras(Imagen 63):
  - Se lleva a cabo la reducción de fibras utilizando un molinete de laboratorio.

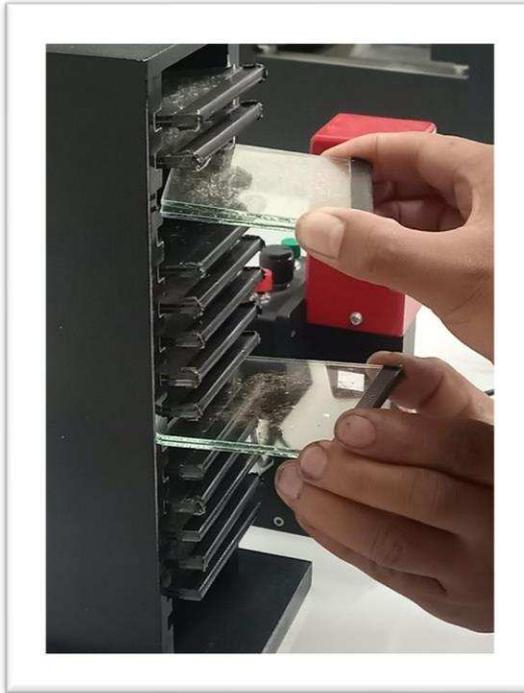
**Imagen 63 Reducción de muestras**



Fuente: Elaboración propia.

- Montaje en el Microscopio OFDA4000(Imagen 64):
  - Las fibras reducidas se colocan sobre una base de vidrio.
  - La base de vidrio se coloca bajo el microscopio OFDA4000, listo para el análisis.

**Imagen 64 Montaje de muestras.**



Fuente: Elaboración propia.

- Análisis Automático(Imagen 65):
  - Se realiza el análisis automático utilizando las capacidades del equipo OFDA 4000.
  - El software del equipo lleva a cabo un análisis detallado de las fibras, generando resultados para varios parámetros.



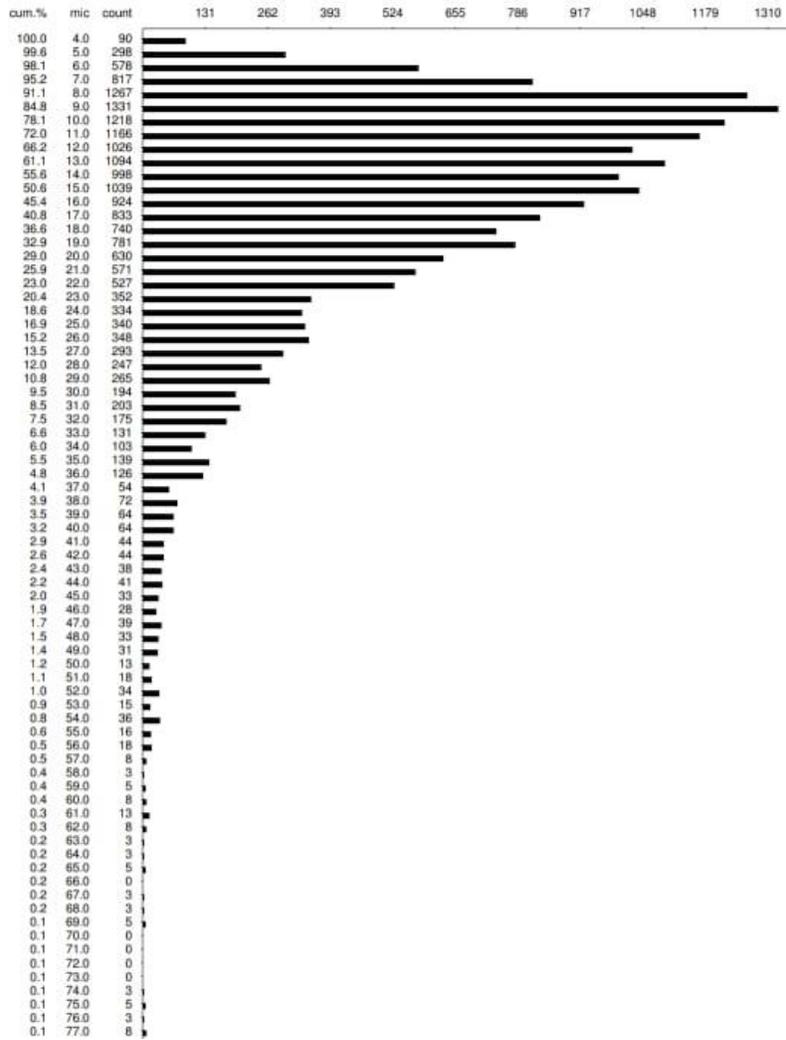
- Generación de Resultados e histogramas (Imagen 67):
  - Los resultados se utilizan para generar estudios de histogramas que representan gráficamente la distribución de los parámetros de finura.
  - Estos histogramas ofrecen una visualización clara y detallada de la composición de la muestra.

### Imagen 67 Resultado de análisis OFDA 4000

#### ANALISIS DE FIBRAS : Diameter Histogram

Date	: 09Nov23	Diam	= 16.86[9.54] um
Sample ID	: OS 1504 M-1_(Av3)	CV	= 56.58 %
Description	: CC-300-T-04	CEM	= 18.79 um
Lot/Cient	: PABLO ANDRES GUMIEL RIVERA	CF	= 91.49 %
Operator	: RBM	Spin fineness	= 23.95
		Sample size	= 20004
		Curve	= 67.90[71.24] deg/mm

OFDA4036:5.357 Cal: D = 5.3880\*WH -3,14  
 Filename: OS 1504 PABLO ANDRES GUMIEL RIVERA.mes



Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. TRATAMIENTOS DE DATOS

Los datos se analizaron utilizando los software estadístico MINITAB y Excel. Se utilizaron las siguientes técnicas de análisis.

### 4.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

Se analizó los datos recopilados según el diseño factorial de dos componentes (factores) AxB y se evaluará el impacto de la variación de la temperatura de conformado en las propiedades de la fibra de PET durante el proceso de hilado centrífugo fundido. Utilizando análisis estadísticos ANOVA, donde se identifiquen las diferencias significativas entre las muestras a diferentes temperaturas de conformado y condición.

El análisis ANOVA calcula un valor F, que se compara con un valor crítico. Si el valor F es mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las medias de los grupos son diferentes.

Para nuestro experimental tenemos la siguiente información que se detalla en la Tabla 12.

**Tabla 12 Información de factores.**

Factor	Niveles	Valores
Condición	2	Con chorro; Sin chorro
Temperatura (°C)	3	260; 280; 300

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de varianza, los valores de p menores a 0.05 rechazan la hipótesis nula, mientras que los valores mayores aceptan la hipótesis nula. Tomaremos en cuenta las siguientes apreciaciones: La hipótesis nula es  $H_0$  y la hipótesis alternativa es  $H_a$ .

Donde:

CC= Con chorro de aire.

SC=Sin chorro de aire.

Tomando en cuenta el diseño factorial de dos componentes AxB, se emplearon cuatro réplicas para cada ensayo de caracterización Tabla 13 potencial de hidrogeno(pH), Tabla 14 densidad( $\rho$ ), Tabla 15 gramaje( $G$ ), Tabla 16 humedad relativa(Hr), Tabla 17 finura( $F$ ), Tabla 18 porcentaje en finura en muestra(% $F$ ), Tabla 19 coeficiente de variación(CV), Tabla 20 extremo más largo ( $CEM$ ), Tabla 21 factor confort(FC), Tabla 22 giro de finura(GF), Tabla 23 curvatura de la finura(CU) y Tabla 24 porcentaje de curva(%CU), los datos analizados se presentan a continuación:

**Tabla 13 Datos experimentales potencial de hidrogeno.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	POTENCIAL DE HIDROGENO(pH)			
		pH	pH	pH	pH
CC	260	6,9000	7,0100	6,5100	6,5700
CC	280	6,6300	6,4300	6,3300	6,4000
CC	300	7,2900	7,4800	7,0000	7,1800
SC	260	7,4800	7,7400	7,7300	7,7400
SC	280	6,0600	6,0100	5,8800	5,5700
SC	300	5,7400	5,6000	5,4900	5,7600

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 14 Datos experimentales densidad.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD( $\frac{g}{cm^3}$ )			
		$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$
CC	260	1,3112	1,2762	1,2803	1,3211
CC	280	0,9027	0,9062	1,0842	1,0490
CC	300	0,7551	0,9982	0,8010	0,8582
SC	260	1,3276	1,1042	1,2616	1,1345
SC	280	1,2455	1,1771	1,2405	1,2575
SC	300	1,0131	1,1491	1,0418	1,0948

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 15 Datos experimentales gramaje.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	GRAMAJE ( $\frac{g}{cm^2}$ )			
		G	G	G	G
CC	260	0,0423	0,0511	0,0438	0,0408
CC	280	0,0479	0,0496	0,0476	0,0493
CC	300	0,0308	0,0558	0,0458	0,0422
SC	260	0,0512	0,0529	0,0514	0,0550
SC	280	0,0366	0,0354	0,0303	0,0286
SC	300	0,0479	0,0445	0,0460	0,0481

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 16 Datos experimentales humedad relativa.**

		<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>			
<b>CONDICIÓN</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<i>Hr</i>	<i>Hr</i>	<i>Hr</i>	<i>Hr</i>
CC	260	0,2634	0,2237	0,2132	0,2718
CC	280	0,1130	0,1343	0,1176	0,1620
CC	300	0,0158	0,0162	0,0290	0,0275
SC	260	0,3107	0,2660	0,0896	0,0108
SC	280	0,2907	0,2420	0,2661	0,2670
SC	300	0,0122	0,0046	0,0613	0,0034

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 17 Datos experimentales finura.**

		<b>FINURA (<math>\mu\text{m}</math>)</b>			
<b>CONDICIÓN</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>
CC	260	19,0500	23,1900	21,3600	21,2000
CC	280	32,2800	23,2300	26,0000	27,1700
CC	300	22,7900	22,4800	20,2700	22,6100
SC	260	19,5300	17,4000	27,6100	21,5100
SC	280	15,4700	17,6100	16,8600	16,6500
SC	300	23,7600	14,1700	24,7500	16,2800

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 18 Datos experimentales porcentaje de finura.**

		<b>PORCENTAJE DE FINURA(%)</b>			
<b>CONDICIÓN</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<i>%F</i>	<i>%F</i>	<i>%F</i>	<i>%F</i>
CC	260	12,8600	13,7600	14,9600	13,8600
CC	280	18,5200	15,2000	17,2100	16,9800
CC	300	14,6500	15,3800	13,6800	14,8100
SC	260	11,5300	10,6800	16,9200	13,0400
SC	280	9,2600	11,3500	9,5400	10,0500
SC	300	14,4200	9,1700	15,1600	9,2600

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19 Datos experimentales coeficiente de variación.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)			
		%CV	%CV	%CV	%CV
CC	260	67,5100	59,3400	70,0400	65,6300
CC	280	57,3700	65,4300	66,1900	63,0000
CC	300	64,2800	68,4200	67,4900	65,5000
SC	260	59,0400	61,3800	61,2800	60,5700
SC	280	59,8600	64,4500	56,5800	60,3000
SC	300	60,6900	64,7100	61,2500	56,8800

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20 Datos experimentales extremo más largo.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	EXTREMO MÁS LARGO ( $\mu\text{m}$ )			
		CEM	CEM	CEM	CEM
CC	260	29,9500	30,3200	33,3300	31,2100
CC	280	35,3200	33,9000	37,2200	35,4800
CC	300	31,7700	35,3400	31,5000	32,6400
SC	260	24,2400	21,8700	36,8700	27,6600
SC	280	17,2200	23,8300	18,7900	19,9500
SC	300	31,6700	16,9800	33,5200	17,9900

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21 Datos experimentales factor confort.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	FACTOR CONFORT(%)			
		FC	FC	FC	FC
CC	260	86,3800	78,8800	79,5000	81,5900
CC	280	54,7300	76,3500	68,9900	66,6900
CC	300	77,4900	77,5200	82,7600	77,9800
SC	260	86,5800	90,0400	65,6500	80,7600
SC	280	94,0400	88,0400	91,4900	91,1900
SC	300	75,8600	94,9600	71,4700	92,8000

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22 Datos experimentales giro de finura.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	GIRO DE FINURA ( $\mu\text{m}$ )			
		<i>GF</i>	<i>GF</i>	<i>GF</i>	<i>GF</i>
CC	260	30,3900	33,9400	34,9700	33,1100
CC	280	46,2600	36,2700	40,9200	41,1500
CC	300	35,1600	36,2000	32,3300	35,3300
SC	260	28,4800	26,0300	41,2600	31,9200
SC	280	22,7700	27,2100	23,9500	24,6400
SC	300	35,1900	21,9600	36,9800	23,2100

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 23 Datos experimentales curvatura de fibra.**

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	CURVATURA DE FIBRA ( $\frac{\text{deg}}{\text{mm}}$ )			
		<i>CU</i>	<i>CU</i>	<i>CU</i>	<i>CU</i>
CC	260	52,6900	58,4600	62,7000	57,9500
CC	280	54,0700	65,3900	63,3800	60,9500
CC	300	60,5900	63,0200	68,0000	51,7100
SC	260	95,9800	51,3100	58,1400	68,4800
SC	280	60,0400	68,6300	67,9000	65,5200
SC	300	51,3600	64,3600	46,5800	58,2800

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24 Datos experimentales porcentaje de curvatura.**

PORCENTAJE DE CURVATURA(%)					
CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	% <i>CU</i>	% <i>CU</i>	% <i>CU</i>	% <i>CU</i>
CC	260	65,0900	64,6700	70,9200	66,9000
CC	280	65,8500	71,7500	73,4800	70,3600
CC	300	70,4700	71,4400	76,2000	62,4700
SC	260	88,3300	61,6100	70,1700	73,3700
SC	280	67,6700	75,7400	71,2400	71,5500
SC	300	63,2400	69,6600	62,1400	69,2300

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO

Se realizó una comparación utilizando los valores de las predicciones de respuestas halladas con las ecuaciones de regresión del análisis de varianza para cada variable dependiente, clasificada según su temperatura de conformado y su condición de aire. Los detalles se encuentran en la Tabla 25.

**Tabla 25 Promedios de cada ensayo de caracterización.**

C	T	pH	$\rho$	G	Hr	F	%F	CV	CEM	FC	GF	CU	%CU
	°C	pH	$\frac{g}{cm^3}$	$\frac{g}{cm^2}$	%	$\mu m$	%	%	$\mu m$	%	$\mu m$	$\frac{deg}{mm}$	%
CC	260	6,7475	1,2972	0,0445	0,2430	21,2000	13,8600	65,6300	31,2025	81,5875	33,1025	57,9500	66,8950
CC	280	6,4475	0,9855	0,0486	0,1317	27,1700	16,9775	62,9975	35,4800	66,6900	41,1500	60,9475	70,3600
CC	300	7,2375	0,8531	0,0437	0,0221	22,0375	14,6300	66,4225	32,8125	78,9375	34,7550	60,8300	70,1450
SC	260	7,6725	1,2070	0,0526	0,1693	21,5125	13,0425	60,5675	27,6600	80,7575	31,9225	68,4775	73,3700
SC	280	5,8800	1,1552	0,0327	0,2665	16,6475	10,0500	60,2975	19,9475	91,1900	24,6425	65,5225	71,5500
SC	300	5,6475	1,0747	0,0466	0,0204	19,7400	12,0025	60,8825	25,0400	83,7725	29,3350	55,1450	66,0675

Fuente: Elaboración propia.

Como referencia base, se tomaron los valores experimentales obtenidos para una fibra de poliéster comercial, como se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 26 Datos de caracterización de fibra poliéster.**

FIBRA POLIÉSTER												
pH	$\rho$	G	Hr	F	%F	CV	CEM	FC	GF	CU	%CU	
pH	$\frac{g}{cm^3}$	$\frac{g}{cm^2}$	%	$\mu m$	%	%	$\mu m$	%	$\mu m$	$\frac{deg}{mm}$	%	
7,1800	0,8496	0,0318	0,0617	42,2600	14,8500	35,1400	17,6600	20,1900	47,3500	49,5400	44,8300	

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis comparativos realizados para los ensayos de caracterización incluyen comparaciones gráficas generales de todas las fibras estudiadas, comparaciones por temperatura y condición de chorro, y comparaciones de error porcentual.

## CAPITULO V

### 5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados de la investigación se expresan en función de los dos análisis realizados: el análisis ANOVA y el análisis comparativo. Además, se realizaron caracterizaciones específicas de aplicaciones sonoras (reducción de ruido) y aplicaciones térmicas (aislamiento térmico) en fibras seleccionadas.

#### 5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

##### 5.1.1. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: POTENCIAL DE HIDROGENO(PH) VS CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 27 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 68).

**Tabla 27 Análisis de varianza pH**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	12,1086	2,42172	73,36	0,000
<b>Lineal</b>	3	5,7098	1,90325	57,66	0,000
<b>Condición</b>	1	1,0127	1,01270	30,68	0,000
<b>Temperatura</b>	2	4,6971	2,34853	71,15	0,000
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	6,3989	3,19943	96,92	0,000
<b>Condición*Temperatura</b>	2	6.3989	3.19943	96,92	0,000
<b>Error</b>	18	0,5942	0,03301		
<b>Total</b>	23	12,7028			

Fuente: Elaboración propia.

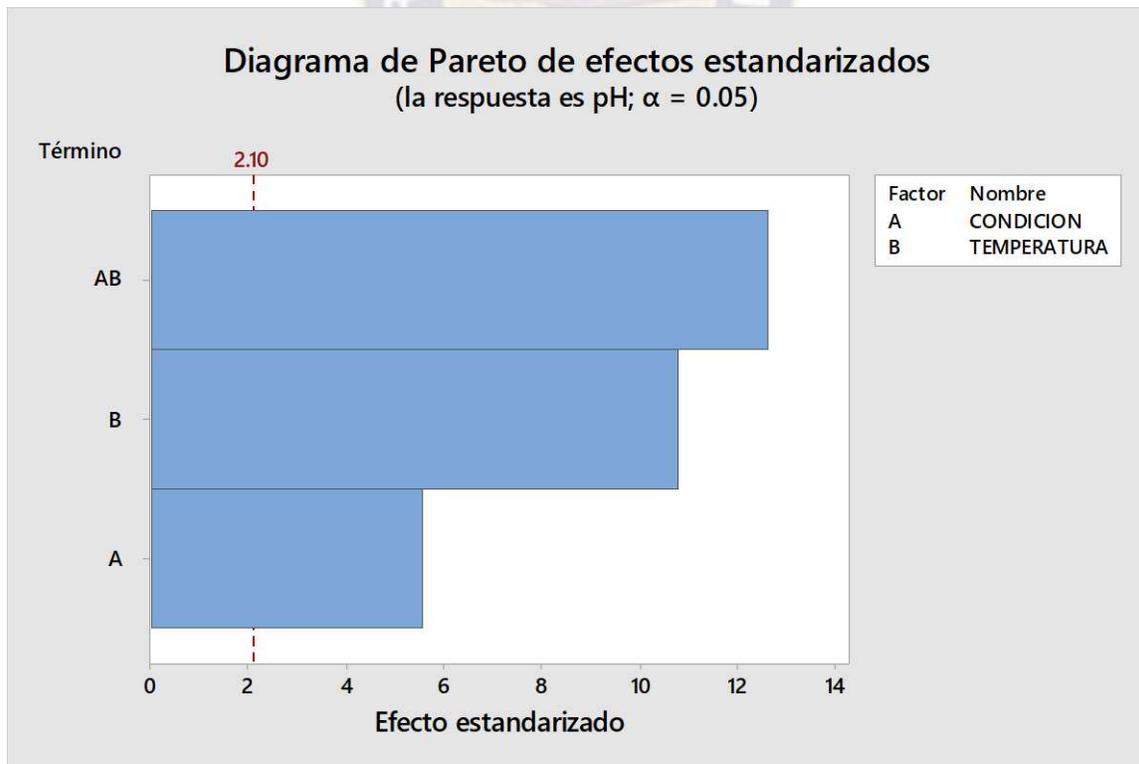
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 28 tendríamos:

Tabla 28 Hipótesis y criterio para pH

Hipótesis	Criterio
Ho el factor temperatura no afecta al potencial de hidrogeno(pH).(nula)	Rechazo
Ha el factor temperatura si afecta al potencial de hidrogeno(pH).	Aceptación
Ho el factor condición no afecta al potencial de hidrogeno(pH).(nula)	Rechazo
Ha el factor condición si afecta al potencial de hidrogeno(pH).	Aceptación
Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al potencial de hidrogeno(pH).(nula)	Rechazo
Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al potencial de hidrogeno(pH).	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 68 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados pH



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo general es estadísticamente significativo, ya que el valor p es muy pequeño (0,000). Esto indica que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (pH).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: Tanto la Condición como la Temperatura individualmente tienen efectos significativos en el pH, ya que los valores p son muy bajos (0,000).

Condición: El valor p para la Condición es 0,000, lo que indica que hay una diferencia significativa en el pH entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura: El valor p para la Temperatura también es 0.000, lo que indica que hay una diferencia significativa en el pH entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura:

La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor p = 0,000), lo que sugiere que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto en el pH que no se explica por los efectos individuales de cada variable.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

El modelo sugiere que tanto la Condición como la Temperatura (y su interacción) influyen significativamente en el pH.

La interacción significa que la relación entre la Condición y el pH puede depender de la Temperatura y viceversa.

El modelo parece ajustarse bien a los datos, ya que la mayoría de la variabilidad está explicada (SC Ajust. alta en comparación con el Error).

**Tabla 29 Resumen del modelo pH**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
<b>0,181686</b>	95,32%	94,02%	91,68%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 30 Coeficientes de análisis (pH)**

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
<b>CONSTANTE</b>	6,6054	0,0371	178,11	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	0,2054	0,0371	5,54	0,000	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	-0,2054	0,0371	-5,54	0,000	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,6046	0,0524	11,53	0,000	1,33
<b>280 °C</b>	-0,4417	0,0524	-8,42	0,000	1,33
<b>300 °C</b>	-0,1629	0,0524	-3,11	0,006	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-0,6679	0,0524	-12,73	0,000	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	0,0783	0,0524	1,49	0,153	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	0,5896	0,0524	11,24	0,000	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	0,6679	0,0524	12,73	0,000	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-0,0783	0,0524	-1,49	0,153	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	-0,5896	0,0524	-11,24	0,000	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

**pH** = 6,6054 + 0,2054 **CONDICIÓN CON CHORRO** - 0,2054 **CONDICIÓN SIN CHORRO**+  
0,6046 **TEMPERATURA 260** - 0,4417 **TEMPERATURA 280** - 0,1629 **TEMPERATURA 300** -  
0,6679 **CONDICIÓN\*TEMPERATURA CON CHORRO 260** + 0,0783  
**CONDICIÓN\*TEMPERATURA CON CHORRO 280** + 0,5896  
**CONDICIÓN\*TEMPERATURA CON CHORRO 300** + 0,6679  
**CONDICIÓN\*TEMPERATURA SIN CHORRO 260** - 0,0783 **CONDICIÓN\*TEMPERATURA**  
**SIN CHORRO 280** - 0,5896 **CONDICIÓN\*TEMPERATURA SIN CHORRO 300**.

Donde:

pH = potencial de hidrogeno

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el pH. Cada coeficiente indica el cambio en el pH asociado con un cambio unitario en la variable correspondiente, manteniendo las otras constantes.

El modelo tiene un excelente ajuste (Tabla 29), con un R-cuadrado ajustado del 95,32%. Esto significa que el 95,32% de la variabilidad en el pH puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coeficientes Significativos (Tabla 30):

Todos los coeficientes tienen valores p muy bajos (menos de 0,05), lo que indica que todos los términos del modelo son estadísticamente significativos.

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

Con chorro tiene un efecto positivo significativo en el pH.

Sin chorro tiene un efecto negativo significativo en el pH.

Temperatura:

La temperatura de 260 °C tiene un efecto positivo significativo en el pH.

La temperatura de 280 °C tiene un efecto negativo significativo en el pH.

La temperatura de 300 °C tiene un efecto negativo significativo en el pH.

Interacciones Condición\*Temperatura:

Las interacciones son significativas, lo que sugiere que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto adicional en el pH.

Interpretación Práctica:

El modelo sugiere que la condición del proceso y la temperatura son factores significativos para predecir el pH.

Los coeficientes indican la dirección y magnitud de estos efectos.

### 5.1.2. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: DENSIDAD( $g/cm^3$ ) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 31 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 69).

Análisis de Varianza

**Tabla 31 Análisis de varianza Densidad**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	0,51176	0,102352	17,25	0,000
<b>Lineal</b>	3	0,40014	0,133378	22,49	0,000
<b>Condición</b>	1	0,06039	0,060391	10,18	0,005
<b>Temperatura</b>	2	0,33974	0,169872	28,64	0,000
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	0,11163	0,055813	9,41	0,002
<b>Condición*temperatura</b>	2	0,11163	0,055813	9,41	0,002
<b>Error</b>	18	0,10677	0,005932		
<b>Total</b>	23	0,61853			

Fuente: Elaboración propia.

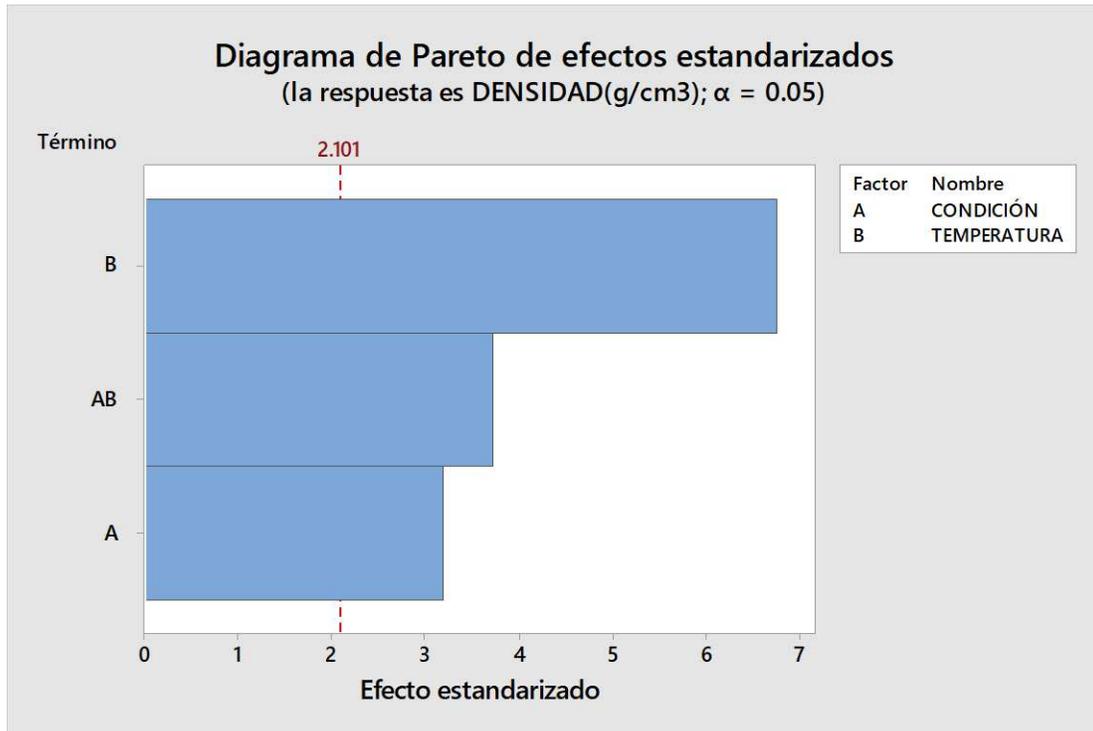
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 32 tendríamos:

**Tabla 32 Hipótesis y criterio para Densidad.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta a la Densidad (<math>gr/cm^3</math>) . (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor temperatura si afecta a la Densidad (<math>gr/cm^3</math>).</b>	Aceptación
<b>Ho el factor condición no afecta a la Densidad (<math>gr/cm^3</math>). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta a la Densidad (<math>gr/cm^3</math>).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta a la Densidad (<math>gr/cm^3</math>). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta a la Densidad(<math>gr/cm^3</math>) .</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 69 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Densidad.**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo general es estadísticamente significativo (Valor p = 0,000), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (Densidad).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: Tanto la Condición como la Temperatura individualmente tienen efectos significativos en la Densidad, ya que los valores p son muy bajos (0,000).

Condición:

El valor p para la Condición es 0,001, indicando que hay una diferencia significativa en la Densidad entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura también es 0,000, lo que indica que hay una diferencia significativa en la Densidad entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura:

La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor p = 0,001), sugiriendo que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto en la Densidad que no se explica por los efectos individuales de cada variable.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

Resumen del modelo

**Tabla 33 Resumen del modelo Densidad**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
<b>0,0770179</b>	82,74%	77,94%	69,31%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 34 Coeficientes de análisis (Densidad)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>CONSTANTE</b>	1,0954	0,0157	69,68	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	-0,0502	0,0157	-3,19	0,005	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	0,0502	0,0157	3,19	0,005	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,1566	0,0222	7,05	0,000	1,33
<b>280 °C</b>	-0,0251	0,0222	-1,13	0,274	1,33
<b>300 °C</b>	-0,1315	0,0222	-5,92	0,000	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	0,0953	0,0222	4,29	0,000	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	-0,0347	0,0222	-1,56	0,137	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	-0,0606	0,0222	-2,73	0,014	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	-0,0953	0,0222	-4,29	0,000	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	0,0347	0,0222	1,56	0,137	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	0,0606	0,0222	2,73	0,014	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1,0954 - 0,0502 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} + 0,0502 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,1566 \text{ TEMPERATURA } 260 - 0,0251 \text{ TEMPERATURA } 280 - 0,1315 \text{ TEMPERATURA } 300 + 0,0953 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 - 0,0347 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 - 0,0606 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 - 0,0953 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 + 0,0347 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 + 0,0606 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300$$

Donde:

$\rho$  = densidad

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y la densidad. Cada coeficiente indica el cambio en la densidad asociado con un cambio unitario en la variable correspondiente, manteniendo las otras constantes.

El modelo tiene un buen ajuste (Tabla 33), con un R-cuadrado ajustado del 83,75%. Esto indica que el 83,75% de la variabilidad en la densidad puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coefficientes Significativos (Tabla 34):

Todos los coeficientes tienen valores p muy bajos (menos de 0,05), lo que indica que todos los términos del modelo son estadísticamente significativos.

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

Con chorro tiene un efecto negativo significativo en la densidad.

Sin chorro tiene un efecto positivo significativo en la densidad.

Temperatura:

La temperatura de 260 °C tiene un efecto positivo significativo en la densidad.

La temperatura de 280 °C no tiene un efecto negativo en la densidad.

La temperatura de 300 °C tiene un efecto negativo significativo en la densidad.

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, lo que sugiere que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto adicional en la densidad.

Interpretación Práctica:

La condición del proceso y la temperatura son factores significativos para predecir la densidad.

### 5.1.3. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: GRAMAJE( $g/cm^2$ ) VS. CONDICIÓN ; TEMPERATURA.

En la Tabla 35 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 70).

**Tabla 35 Análisis de varianza Gramaje**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	0,000905	0,000181	7,27	0,001
<b>Lineal</b>	3	0,000266	0,000089	3,57	0,035
<b>Condición</b>	1	0,000015	0,000015	0,61	0,445
<b>Temperatura</b>	2	0,000251	0,000126	5,04	0,018
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	0,000639	0,000319	12,83	0,000
<b>Condición*Temperatura</b>	2	0,000639	0,000319	12,83	0,000
<b>Error</b>	18	0,000448	0,000025		
<b>Total</b>	23	0,001353			

Fuente: Elaboración propia.

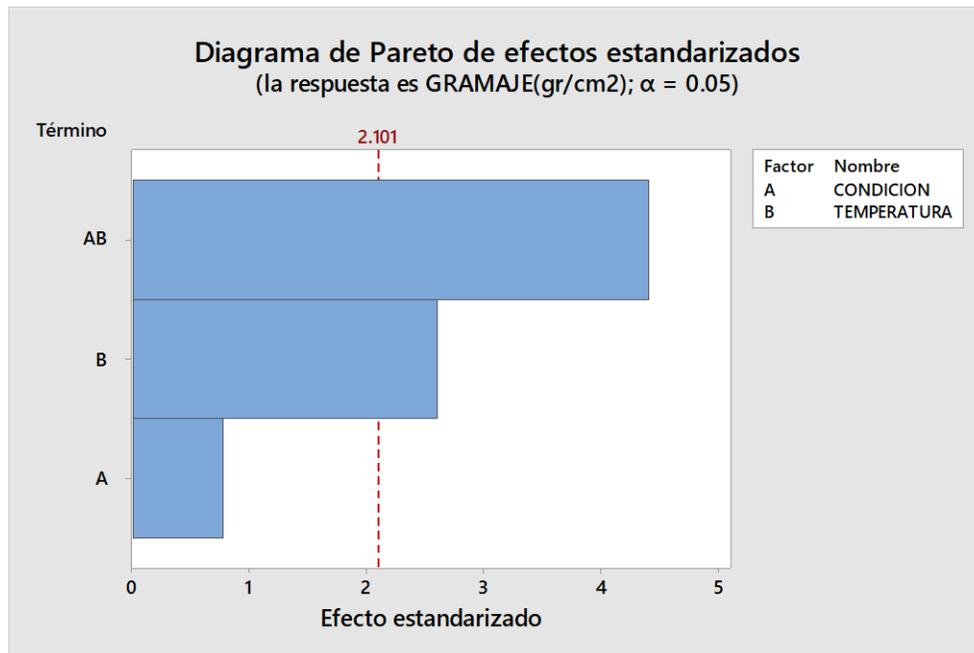
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 36 tendríamos:

**Tabla 36 Hipótesis y criterio para Gramaje.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{g}{cm^2}\right)</math>.(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor temperatura si afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{g}{cm^2}\right)</math>.</b>	Aceptación
<b>Ho el factor condición no afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{gr}{cm^2}\right)</math>.(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor condición si afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{g}{cm^2}\right)</math>.</b>	Rechazo
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{g}{cm^2}\right)</math>.(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta a él Gramaje <math>\left(\frac{g}{cm^2}\right)</math>.</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 70 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Gramaje.**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo general es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,001$ ), indicando que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (Gramaje).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: En este caso, el modelo lineal es significativo (Valor  $p = 0,035$ ), lo que sugiere que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición: El valor  $p$  para la Condición es 0,445, lo que indica que no hay una diferencia significativa en el Gramaje entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura: El valor  $p$  para la Temperatura es 0,018, lo que sugiere que hay una diferencia significativa en el Gramaje entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura:

La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor  $p = 0,000$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto en el Gramaje que no se explica por los efectos individuales de cada variable.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 37 Resumen del modelo Gramaje.**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
<b>0,0049892</b>	66,88%	57,68%	41,12%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 38 Coeficientes de análisis (Gramaje)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>CONSTANTE</b>	0,04479	0,00102	43,98	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	0,00080	0,00102	0,78	0,445	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	-0,00080	0,00102	-0,78	0,445	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,00378	0,00144	2,62	0,017	1,33
<b>280 °C</b>	-0,00413	0,00144	-2,86	0,010	1,33
<b>300 °C</b>	0,00035	0,00144	0,24	0,811	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-0,00486	0,00144	-3,37	0,003	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	0,00714	0,00144	4,96	0,000	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	-0,00228	0,00144	-1,59	0,130	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	0,00486	0,00144	3,37	0,003	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-0,00714	0,00144	-4,96	0,000	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	0,00228	0,00144	1,59	0,130	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$G \text{ (g/cm}^2\text{)} = 0,04479 + 0,00080 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 0,00080 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,00378 \text{ TEMPERATURA } 260 - 0,00413 \text{ TEMPERATURA } 280 + 0,00035 \text{ TEMPERATURA } 300 - 0,00486 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 + 0,00714 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 - 0,00228 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 + 0,00486 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 - 0,00714 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 + 0,00228 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300,$$

Donde:

Gramaje=G

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el gramaje. Sin embargo, la falta de significancia estadística en algunas variables indica que el modelo puede no ser robusto.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 66,88%(Tabla 37), lo que indica que el 66,88% de la variabilidad en el gramaje puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coefficientes Significativos(Tabla 38):

La condición y las interacciones condición\*temperatura no son significativas estadísticamente (valor  $p > 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, no tiene un efecto significativo en el gramaje.

Temperatura:

La temperatura de 260 °C tiene un efecto positivo significativo en el gramaje.

La temperatura de 280 °C tiene un efecto negativo significativo en el gramaje.

La temperatura de 300 °C no tiene un efecto significativo en el gramaje.

Interacciones Condición\*Temperatura:

Ninguna de las interacciones condición\*temperatura es significativa, lo que indica que la relación entre la condición y la temperatura no tiene un impacto significativo en el gramaje.

Interpretación Práctica:

Basado en los resultados, la condición y las interacciones no contribuyen significativamente a la predicción del gramaje.

#### 5.1.4. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: HUMEDAD RELATIVA(%) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 39 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 71).

**Tabla 39 Análisis de varianza Humedad relativa.**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Modelo</b>	5	0,222823	0,044565	11,72	0,000
<b>Lineal</b>	3	0,177976	0,059325	15,61	0,000
<b>Condición</b>	1	0,002338	0,002338	0,62	0,443
<b>Temperatura</b>	2	0,175638	0,087819	23,11	0,000
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	0,044848	0,022424	1,44	0,264
<b>Condición*Temperatura</b>	2	0,044848	0,022424	1,44	0,264
<b>Error</b>	18	0,068415	0,003801		
<b>Total</b>	23	0,291238			

Fuente: Elaboración propia.

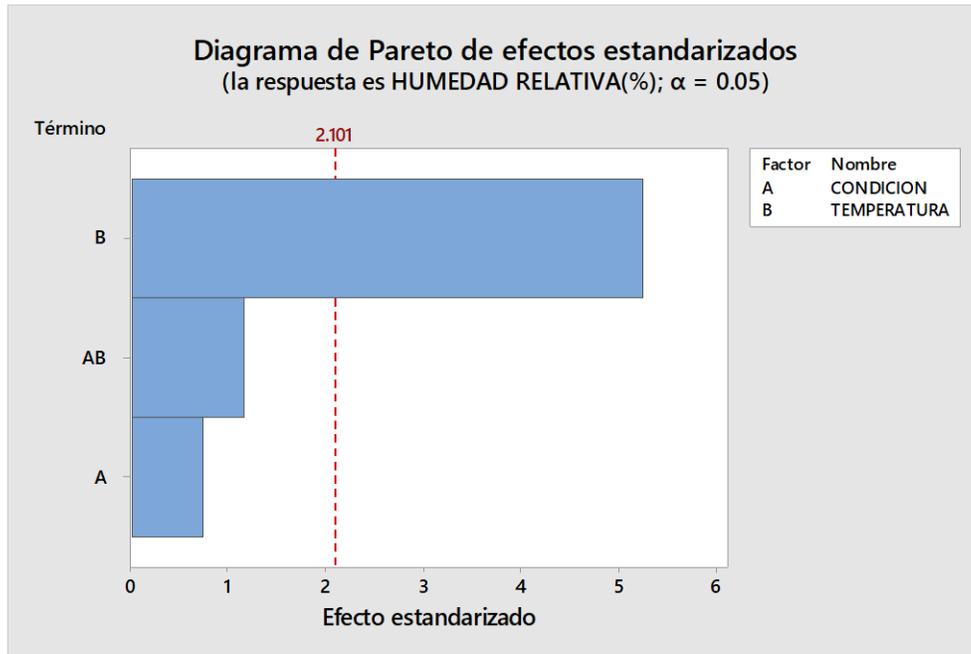
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 40 tendríamos:

**Tabla 40 Hipótesis y criterio para Humedad relativa.**

<b>Hipótesis</b>	<b>Criterio</b>
<b>Ho el factor temperatura no afecta a la Humedad relativa(%).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor temperatura si afecta a la Humedad relativa(%).</b>	Aceptación
<b>Ho el factor condición no afecta a la Humedad relativa(%). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor condición si afecta a la Humedad relativa(%).</b>	Rechazo
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta a la Humedad relativa(%). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta a la Humedad relativa(%).</b>	Rechazo

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 71 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Humedad relativa.**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,000$ ), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (Humedad relativa).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal también es significativo (Valor  $p = 0,000$ ), indicando que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor p para la Condición es 0,470, lo que sugiere que no hay una diferencia significativa en la Humedad relativa entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura es 0,000, indicando que hay una diferencia significativa en la Humedad relativa entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura:

La interacción entre Condición y Temperatura no es significativa (Valor  $p = 0,264$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura no tiene un efecto conjunto significativo en la humedad relativa.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 41 Resumen del modelo Humedad relativa**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
<b>0,0709929</b>	68,45%	59,68%	43,91%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 42 Coeficientes de análisis (Humedad relativa)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	0,1413	0,0145	9,75	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	-0,0107	0,0145	-0,74	0,470	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	0,0107	0,0145	0,74	0,470	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,0398	0,0205	1,94	0,068	1,33
<b>280 °C</b>	0,0803	0,0205	3,92	0,001	1,33
<b>300 °C</b>	-0,1201	0,0205	-5,86	0,000	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	0,0226	0,0205	1,10	0,285	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	-0,0342	0,0205	-1,67	0,113	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	0,0116	0,0205	0,57	0,579	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	-0,0226	0,0205	-1,10	0,285	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	0,0342	0,0205	1,67	0,113	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	-0,0116	0,0205	-0,57	0,579	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$H_r(\%) = 0,1422 - 0,0099 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} + 0,0099 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,0640 \text{ TEMPERATURA } 260 + 0,0569 \text{ TEMPERATURA } 280 - 0,1209 \text{ TEMPERATURA } 300 + 0,0467 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 - 0,0575 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 + 0,0107 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 - 0,0467 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 + 0,0575 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 - 0,0107 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300$$

Donde:

Humedad relativa =  $H_r$

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y la humedad relativa. Sin embargo, la falta de significancia estadística en algunas variables indica que el modelo puede no ser robusto.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 59,68% (Tabla 41), lo que indica que el 59,68% de la variabilidad en la humedad relativa puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coefficientes Significativos (Tabla 42):

La condición y las interacciones condición\*temperatura no son significativas estadísticamente (valor  $p > 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, no tiene un efecto significativo en la humedad relativa.

Temperatura:

La temperatura de 260 °C no tiene un efecto significativo en la humedad relativa.

La temperatura de 280 °C tiene un efecto negativo significativo en la humedad relativa.

La temperatura de 300 °C tiene un efecto negativo significativo en la humedad relativa.

Interacciones Condición\*Temperatura:

Ninguna de las interacciones condición\*temperatura es significativa, lo que indica que la relación entre la condición y la temperatura no tiene un impacto significativo en la humedad relativa.

Interpretación Práctica:

Basado en los resultados, la condición y las interacciones no contribuyen significativamente a la predicción de la humedad relativa.

### 5.1.5. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: FINURA ( $\mu m$ ) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA

En la Tabla 43 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 72).

**Tabla 43 Análisis de varianza Finura**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	236,370	47,274	4,24	0,010
<b>Lineal</b>	3	108,463	36,154	3,25	0,046
<b>Condición</b>	1	104,292	104,292	9,36	0,007
<b>Temperatura</b>	2	4,171	2,086	0,19	0,831
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	127,907	63,953	5,74	0,012
<b>Condición*Temperatura</b>	2	127,907	63,953	5,74	0,012
<b>Error</b>	18	200,464	11,137		
<b>Total</b>	23	436,834			

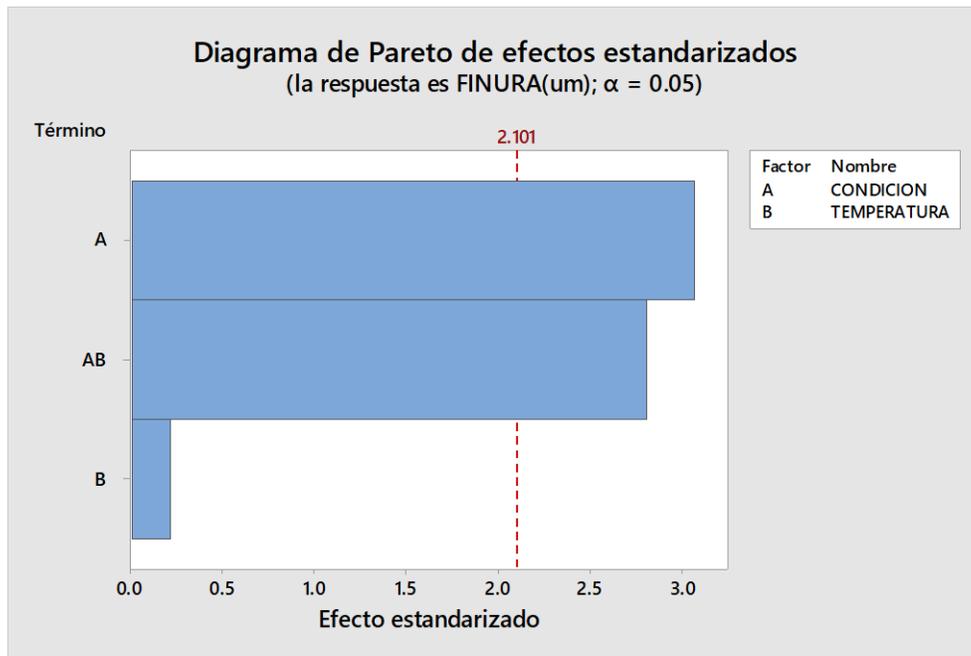
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 44 Hipótesis y criterio para Finura**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta a la Finura (F).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta a la Finura (F).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta a la Finura (F).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta a la Finura (F).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta a la Finura (F).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta a la Finura (F).</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 72 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Finura**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,010$ ), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (Finura).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal es significativo (Valor  $p = 0,046$ ), indicando que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor p para la Condición es 0,007, lo que sugiere que hay una diferencia significativa en la Finura entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura es 0,831, lo que indica que no hay una diferencia significativa en la Finura entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura:

La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor  $p = 0,012$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en la Finura.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 45 Resumen del modelo Finura**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,33720	54,11%	41,36%	18,42%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 46 Coeficientes de análisis (Finura)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	21,385	0,681	31,39	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	2,085	0,681	3,06	0,007	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	-2,085	0,681	-3,06	0,007	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	-0,028	0,963	-0,03	0,977	1,33
<b>280 °C</b>	0,524	0,963	0,54	0,593	1,33
<b>300 °C</b>	-0,496	0,963	-0,51	0,613	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-2,241	0,963	-2,33	0,032	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	3,177	0,963	3,30	0,004	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	-0,936	0,963	-0,97	0,344	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	2,241	0,963	2,33	0,032	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-3,177	0,963	-3,30	0,004	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	0,936	0,963	0,97	0,344	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$F(\mu\text{m}) = 21,385 + 2,085 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 2,085 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} - 0,028 \text{ TEMPERATURA } 260 + 0,524 \text{ TEMPERATURA } 280 - 0,496 \text{ TEMPERATURA } 300 - 2,241 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 + 3,177 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 - 0,936 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 + 2,241 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 - 3,177 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 + 0,936 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300$$

Donde:

$F(\mu\text{m}) = \text{Finura}$

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y la finura.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 41,36% (Tabla 45), lo que indica que el 41,36% de la variabilidad en la finura puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coefficientes Significativos (Tabla 46):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en la finura.

El coeficiente positivo para "CON CHORRO" indica que la finura es mayor cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en la finura (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, indicando que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en la finura.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente la finura, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en la finura.

### 5.1.6. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: PORCENTAJE DE FINURA(%) CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 47 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 73).

**Tabla 47 Análisis de varianza Porcentaje de finura.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	111,288	22,2575	6,06	0,002
<b>Lineal</b>	3	71,889	23,9630	6,52	0,004
<b>Condición</b>	1	71,726	71,7258	19,52	0,000
<b>Temperatura</b>	2	0,163	0,0815	0,02	0,978
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	39,399	19,6994	5,36	0,015
<b>Condición*Temperatura</b>	2	39,399	19,6994	5,36	0,015
<b>Error</b>	18	66,147	3,6749		
<b>Total</b>	23	177,435			

Fuente: Elaboración propia.

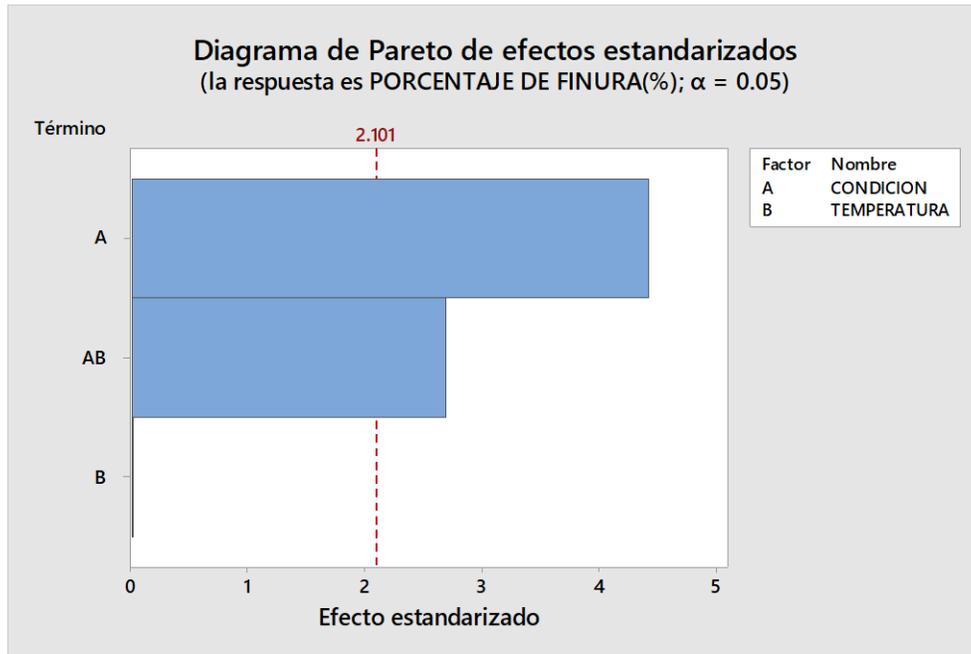
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 48 tendríamos:

**Tabla 48 Hipótesis y criterio para Porcentaje de finura.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta al porcentaje de finura(%).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al porcentaje de finura(%).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al porcentaje de finura(%).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta al porcentaje de finura(%).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al porcentaje de finura(%).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al porcentaje de finura(%).</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 73 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Porcentaje de finura**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,002$ ), indicando que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la variable dependiente (Porcentaje de finura).

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal también es significativo (Valor  $p = 0,004$ ), sugiriendo que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor  $p$  para la Condición es 0,000, lo que indica que hay una diferencia significativa en el Porcentaje de finura entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor  $p$  para la Temperatura es 0,978, indicando que no hay una diferencia significativa en el Porcentaje de finura entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor  $p = 0,015$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en el Porcentaje de finura.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 49 Resumen del modelo Porcentaje de finura.**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
<b>1,91699</b>	62,72%	52,36%	33,72%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 50 Coeficientes de análisis (Porcentaje de finura)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	13,427	0,391	34,31	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	1,729	0,391	4,42	0,000	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	-1,729	0,391	-4,42	0,000	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,024	0,553	0,04	0,966	1,33
<b>280 °C</b>	0,087	0,553	0,16	0,877	1,33
<b>300 °C</b>	-0,111	0,553	-0,20	0,844	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-1,320	0,553	-2,39	0,028	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	1,735	0,553	3,14	0,006	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	-0,415	0,553	-0,75	0,463	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	1,320	0,553	2,39	0,028	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-1,735	0,553	-3,14	0,006	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	0,415	0,553	0,75	0,463	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\%F = 13.427 + 1.729 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 1.729 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0.024 \text{ TEMPERATURA 260} + 0.087 \text{ TEMPERATURA 280} - 0.111 \text{ TEMPERATURA 300} - 1.320 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 260} + 1.735 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 280} - 0.415 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 300} + 1.320 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 260} - 1.735 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 280} + 0.415 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 300}$$

Donde:

%F= Porcentaje de finura.

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el porcentaje de finura.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 52,36%(Tabla 49), lo que indica que el 52,36% de la variabilidad en el porcentaje de finura puede explicarse por las variables incluidas en el modelo.

Coefficientes Significativos(Imagen 73):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en el porcentaje de finura.

El coeficiente positivo para "CON CHORRO" indica que el porcentaje de finura es mayor cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en el porcentaje de finura (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, indicando que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en el porcentaje de finura.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente el porcentaje de finura, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en el porcentaje de finura.

### 5.1.7. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: COEFICIENTE DE VARIACIÓN(%); CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 51 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 74).

**Tabla 51 Análisis de varianza Coeficiente de variación**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	144,375	28,875	2,79	0,049
<b>Lineal</b>	3	135,125	45,042	4,35	0,018
<b>Condición</b>	1	117,971	117,971	11,39	0,003
<b>Temperatura</b>	2	17,154	8,577	0,83	0,453
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	9,250	4,625	0,45	0,647
<b>Condición*Temperatura</b>	2	9,250	4,625	0,45	0,647
<b>Error</b>	18	186,493	10,361		
<b>Total</b>	23	330,868			

Fuente: Elaboración propia.

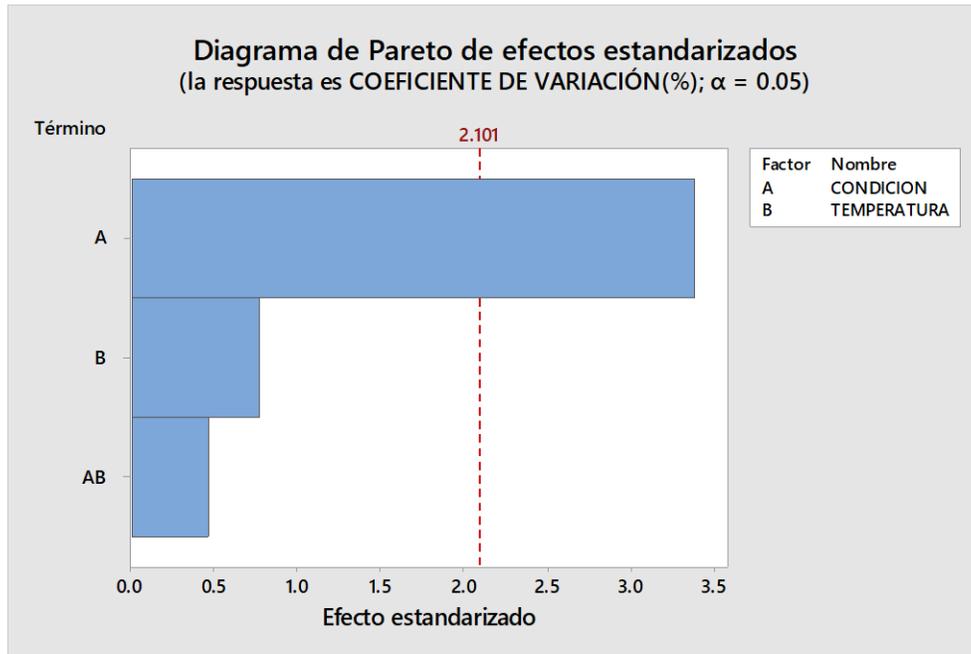
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 52 tendríamos:

**Tabla 52 Hipótesis y criterio para Coeficiente de variación.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta al Coeficiente de variación(%).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al Coeficiente de variación(%).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al Coeficiente de variación(%).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta al Coeficiente de variación(%).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al Coeficiente de variación(%).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al Coeficiente de variación(%).</b>	Rechazo

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 74 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Coeficiente de variación**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es bordeado estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,049$ ), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) podría estar relacionada con el Coeficiente de Variación.

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal es significativo (Valor  $p = 0,018$ ), indicando que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor  $p$  para la Condición es 0,003, lo que indica que hay una diferencia significativa en el Coeficiente de Variación entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor  $p$  para la Temperatura es 0,453, indicando que no hay una diferencia significativa en el Coeficiente de Variación entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura no es significativa (Valor  $p = 0,647$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura no tiene un efecto conjunto significativo en el Coeficiente de Variación.

**Tabla 53 Resumen del modelo Coeficiente de variación**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,21881	43,64%	27,98%	0,00%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 54 Coeficientes de análisis (CV)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	62,800	0,657	95,58	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
CON CHORRO	2,217	0,657	3,37	0,003	1,00
SIN CHORRO	-2,217	0,657	-3,37	0,003	*
<b>TEMPERATURA</b>					
260 °C	0,299	0,929	0,32	0,751	1,33
280 °C	-1,152	0,929	-1,24	0,231	1,33
300 °C	0,853	0,929	0,92	0,371	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
CON CHORRO 260 °C	0,314	0,929	0,34	0,739	1,33
CON CHORRO 280 °C	-0,867	0,929	-0,93	0,363	1,33
CON CHORRO 300 °C	0,553	0,929	0,60	0,559	*
SIN CHORRO 260 °C	-0,314	0,929	-0,34	0,739	*
SIN CHORRO 280 °C	0,867	0,929	0,93	0,363	*
SIN CHORRO 300 °C	-0,553	0,929	-0,60	0,559	*

Fuente: Elaboración propia.

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

Ecuación de regresión

$$\text{CV(\%)} = 62,800 + 2,217 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 2,217 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,299 \text{ TEMPERATURA 260} - 1,152 \text{ TEMPERATURA 280} + 0,853 \text{ TEMPERATURA 300} + 0,314 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 260} - 0,867 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 280} + 0,553 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO 300} - 0,314 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 260} + 0,867 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 280} - 0,553 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 300}$$

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el coeficiente de variación.

Donde:

CV= Coeficiente de variación.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 27,98%(Tabla 53), lo que indica que el 27,98% de la variabilidad en el coeficiente de variación puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. Sin embargo, el R-cuadrado predictivo es 0,00%, lo que sugiere una baja capacidad predictiva.

Coefficientes Significativos(Tabla 54):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en el coeficiente de variación.

El coeficiente positivo para "CON CHORRO" indica que el coeficiente de variación es mayor cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en el coeficiente de variación (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, indicando que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en el coeficiente de variación.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente el coeficiente de variación, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en el coeficiente de variación.

### 5.1.8. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: EXTREMO MÁS LARGO; CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 55 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 75).

**Tabla 55 Análisis de varianza Extremo más largo.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	640,91	128,181	5,68	0,003
<b>Lineal</b>	3	492,99	164,331	7,28	0,002
<b>Condición</b>	1	480,53	480,526	21,30	0,000
<b>Temperatura</b>	2	12,47	6,233	0,28	0,762
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	147,91	73,957	3,28	0,061
<b>Condición*Temperatura</b>	2	147,91	73,957	3,28	0,061
<b>Error</b>	18	406,08	22,560		
<b>Total</b>	23	1046,99			

Fuente: Elaboración propia.

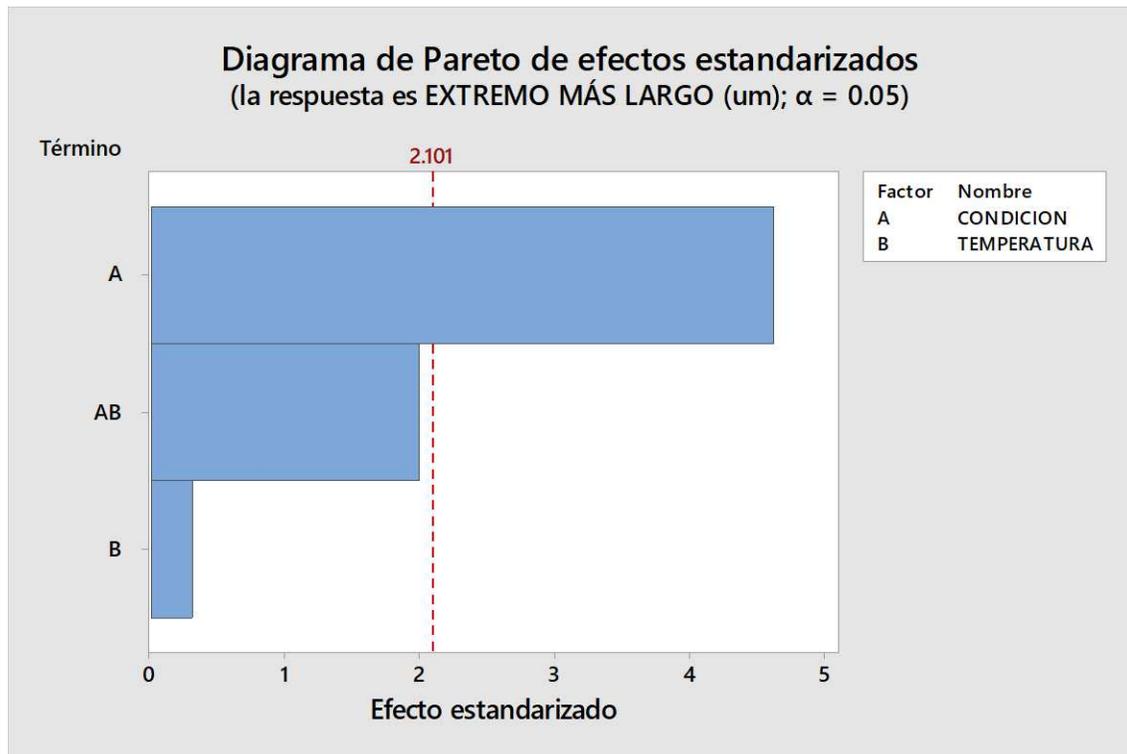
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 56 tendríamos:

**Tabla 56 Hipótesis y criterio para Extremo más largo**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al extremo más largo(<math>\mu</math>).</b>	Rechazo

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 75 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados CEM**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,003$ ), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con el "Extremo más largo".

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal también es significativo (Valor  $p = 0,002$ ), indicando que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor  $p$  para la Condición es 0,000, lo que indica que hay una diferencia significativa en el "Extremo más largo" entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor  $p$  para la Temperatura es 0,762, indicando que no hay una diferencia significativa en el "Extremo más largo" entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura no es significativa (Valor p = 0,061), indicando que la combinación de Condición y Temperatura no tiene un efecto conjunto significativo en el "Extremo más largo".

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 57 Resumen del modelo Extremo más largo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4,74975	61,21%	50,44%	31,05%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 58 Coeficientes de análisis (CEM)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	28,690	0,970	29,59	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	4,475	0,970	4,62	0,000	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	-4,475	0,970	-4,62	0,000	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,74	1,37	0,54	0,596	1,33
<b>280 °C</b>	-0,98	1,37	-0,71	0,485	1,33
<b>300 °C</b>	0,24	1,37	0,17	0,865	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-2,70	1,37	-1,97	0,064	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	3,29	1,37	2,40	0,027	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	-0,59	1,37	-0,43	0,673	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	2,70	1,37	1,97	0,064	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-3,29	1,37	-2,40	0,027	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	0,59	1,37	0,43	0,673	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$CEM(\mu m) = 28,690 + 4,475 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 4,475 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,74 \text{ TEMPERATURA } 260 - 0,98 \text{ TEMPERATURA } 280 + 0,24 \text{ TEMPERATURA } 300 - 2,70 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260$

$+ 3,29 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 - 0,59 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 + 2,70 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 - 3,29 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 + 0,59 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300$

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el extremo más largo.

Donde:

Extremo más grueso=CEM

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 50,44%(Tabla 57), indicando que el 50,44% de la variabilidad en el extremo más largo puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. El R-cuadrado predictivo es del 31,05%, lo que sugiere cierta capacidad predictiva.

Coefficientes Significativos(Tabla 58):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en el extremo más largo.

El coeficiente positivo para "CON CHORRO" indica que el extremo más largo es mayor cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en el extremo más largo (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, lo que indica que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en el extremo más largo.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente el extremo más largo, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en el extremo más largo.

### 5.1.9. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: FACTOR CONFORT(%) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA

En la Tabla 59 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 76).

**Tabla 59 Análisis de varianza Factor de confort.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	1277,56	255,51	4,25	0,010
<b>Lineal</b>	3	570,62	190,21	3,16	0,050
<b>Condición</b>	1	541,69	541,69	9,00	0,008
<b>Temperatura</b>	2	28,93	14,47	0,24	0,789
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	706,94	353,47	5,87	0,011
<b>Condición*Temperatura</b>	2	706,94	353,47	5,87	0,011
<b>Error</b>	18	1082,99	60,17		
<b>Total</b>	23	2360,55			

Fuente: Elaboración propia.

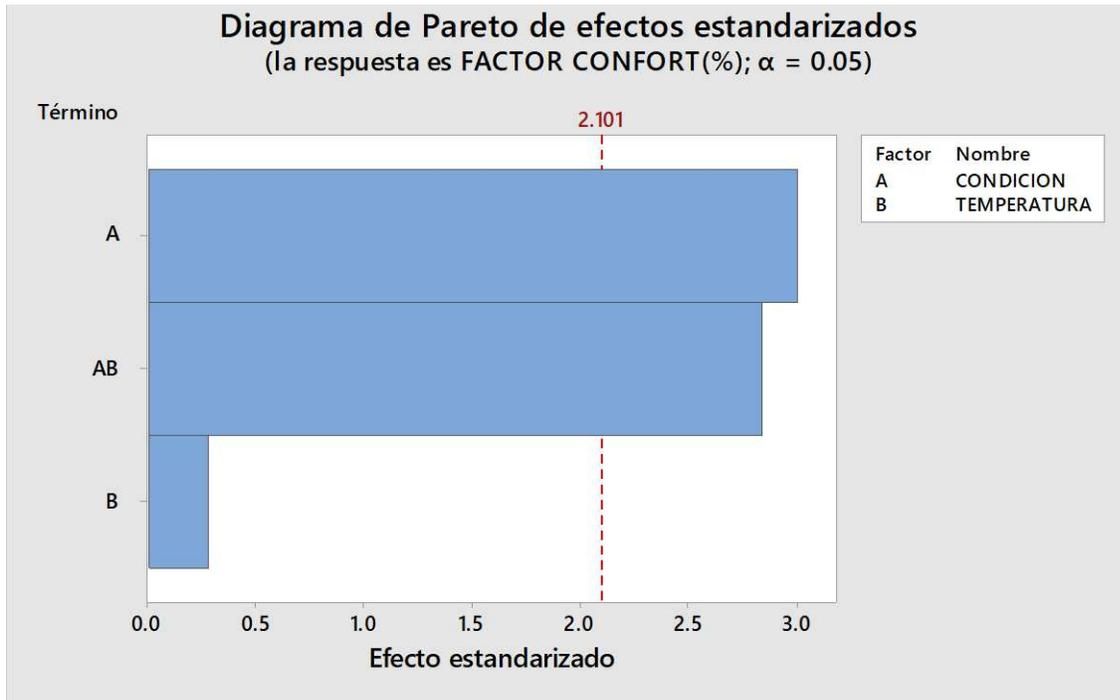
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 60 tendríamos:

**Tabla 60 Hipótesis y criterio para Factor de confort**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta al Factor confort (%).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al Factor confort (%).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al Factor confort (%).(nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta al Factor confort (%).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al Factor confort (%). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al Factor confort (%).</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 76 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Factor confort**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor p = 0,010), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con el "Factor Confort (%)".

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal es significativo (Valor p = 0,050), indicando que hay efectos lineales que podrían ser significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor p para la Condición es 0,008, lo que indica que hay una diferencia significativa en el "Factor Confort (%)" entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura es 0,789, indicando que no hay una diferencia significativa en el "Factor Confort (%)" entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor p = 0,011), indicando que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en el "Factor Confort (%)".

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

Total:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Total: Representa la variabilidad total en los datos antes de cualquier explicación del modelo.

**Tabla 61 Resumen del modelo Factor confort**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,75668	54,12%	41,38%	18,44%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 62 Coeficientes de análisis (FC)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	80,49	1,58	50,84	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	-4,75	1,58	-3,00	0,008	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	4,75	1,58	3,00	0,008	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,68	2,24	0,31	0,764	1,33
<b>280 °C</b>	-1,55	2,24	-0,69	0,498	1,33
<b>300 °C</b>	0,87	2,24	0,39	0,704	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	5,17	2,24	2,31	0,033	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	-7,50	2,24	-3,35	0,004	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	2,33	2,24	1,04	0,311	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	-5,17	2,24	-2,31	0,033	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	7,50	2,24	3,35	0,004	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	-2,33	2,24	-1,04	0,311	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{FC}(\%) = & 80,49 - 4,75 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} + 4,75 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} \\ & + 0,68 \text{ TEMPERATURA } 260 - 1,55 \text{ TEMPERATURA } 280 + 0,87 \text{ TEMPERATURA } 300 \\ & + 5,17 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA } \quad \text{CON} \quad \text{CHORRO} \quad 260 \\ & - 7,50 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA } \quad \text{CON} \quad \text{CHORRO} \quad 280 \\ & + 2,33 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA } \quad \text{CON} \quad \text{CHORRO} \quad 300 \\ & - 5,17 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA } \quad \text{SIN} \quad \text{CHORRO} \quad 260 \\ & + 7,50 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA } \quad \text{SIN} \quad \text{CHORRO} \quad 280 \\ & - 2,33 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300 \end{aligned}$$

Donde:

FC= Factor confort

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el factor de confort.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 41,38%(Tabla 61), lo que indica que el 41,38% de la variabilidad en el factor de confort puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. El R-cuadrado predictivo es del 18,44%, sugiriendo cierta capacidad predictiva.

Coefficientes Significativos(Tabla 62):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en el factor de confort.

El coeficiente negativo para "CON CHORRO" indica que el factor de confort disminuye cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en el factor de confort (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, lo que indica que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en el factor de confort.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente el factor de confort, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en el factor de confort.

#### 5.1.10. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: GIRO DE LA FINURA( $\mu\text{m}$ ) VS. CONDICIÓN; TEMPERATURA.

En la Tabla 63 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto (Imagen 77).

**Tabla 63 Análisis de varianza Giro de la finura.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	609,44	121,888	5,50	0,003
<b>Lineal</b>	3	358,88	119,626	5,40	0,008
<b>Condición</b>	1	355,97	355,971	16,06	0,001
<b>Temperatura</b>	2	2,91	1,454	0,07	0,937
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	250,56	125,281	5,65	0,012
<b>Condición*Temperatura</b>	2	250,56	125,281	5,65	0,012
<b>Error</b>	18	398,96	22,165		
<b>Total</b>	23	1008,40			

Fuente: Elaboración propia.

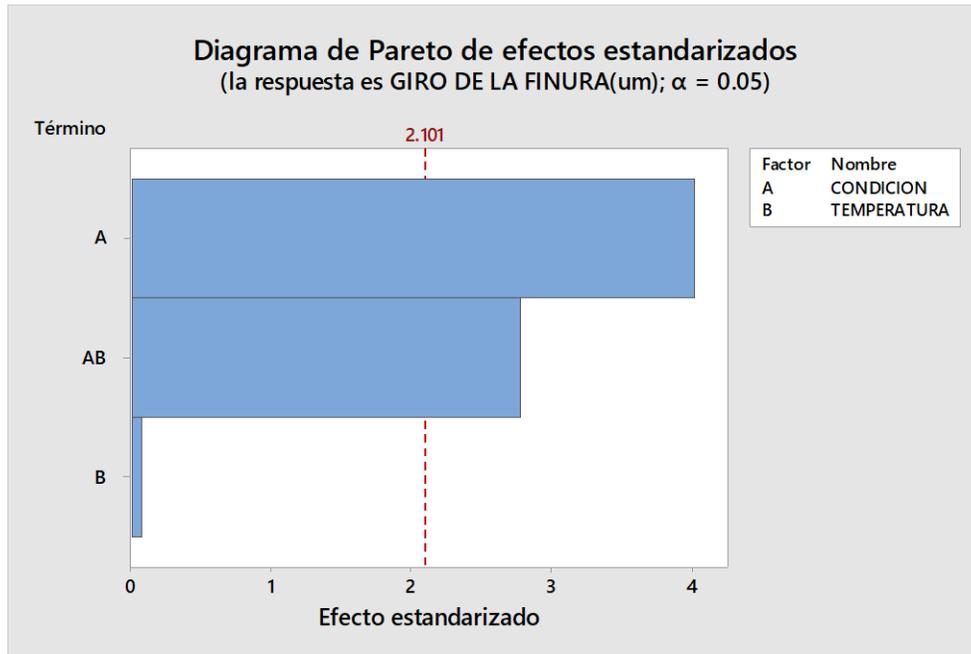
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 64 tendríamos:

**Tabla 64 Hipótesis y criterio para Giro de la finura.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta al Giro de la finura(<math>\mu\text{m}</math>). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al Giro de la finura(<math>\mu\text{m}</math>).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al Giro de la finura (<math>\mu\text{m}</math>). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha el factor condición si afecta al Giro de la finura(<math>\mu\text{m}</math>).</b>	Aceptación
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al Giro de la finura(<math>\mu\text{m}</math>). (nula)</b>	Rechazo
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al Giro de la finura(<math>\mu\text{m}</math>).</b>	Aceptación

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 77 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Giro de la Finura**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,003$ ), lo que sugiere que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con el "Giro de la finura ( $\mu\text{m}$ )".

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal es significativo (Valor  $p = 0,008$ ), indicando que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor p para la Condición es 0,001, lo que indica que hay una diferencia significativa en el "Giro de la finura ( $\mu\text{m}$ )" entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura es 0,937, indicando que no hay una diferencia significativa en el "Giro de la finura ( $\mu\text{m}$ )" entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura es significativa (Valor  $p = 0,012$ ), indicando que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en el "Giro de la finura ( $\mu\text{m}$ )".

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 65 Resumen del modelo Giro de finura.**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4,70792	60,44%	49,45%	29,66%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 66 Coeficientes de análisis (GF)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	32,485	0,961	33,80	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
CON CHORRO	3,851	0,961	4,01	0,001	1,00
SIN CHORRO	-3,851	0,961	-4,01	0,001	*
<b>TEMPERATURA</b>					
260	0,03	1,36	0,02	0,984	1,33
280	0,41	1,36	0,30	0,765	1,33
300	-0,44	1,36	-0,32	0,750	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
CON CHORRO 260 °C	-3,26	1,36	-2,40	0,027	1,33
CON CHORRO 280 °C	4,40	1,36	3,24	0,005	1,33
CON CHORRO 300 °C	-1,14	1,36	-0,84	0,412	*
SIN CHORRO 260 °C	3,26	1,36	2,40	0,027	*
SIN CHORRO 280 °C	-4,40	1,36	-3,24	0,005	*
SIN CHORRO 300 °C	1,14	1,36	0,84	0,412	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{GF}(\mu\text{m}) = & 32,485 + 3,851 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} - 3,851 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + \\ & 0,03 \text{ TEMPERATURA } 260 + 0,41 \text{ TEMPERATURA } 280 - 0,44 \text{ TEMPERATURA } 300 - 3,26 \\ & \text{CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 \\ & + 4,40 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 - 1,14 \\ & \text{CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 + 3,26 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA} \\ & \text{SIN CHORRO } 260 - 4,40 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 + 1,14 \\ & \text{CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300 \end{aligned}$$

Donde:

GF= giro de finura.

La ecuación de regresión proporciona la relación matemática entre las variables predictoras y el giro de la finura.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado del 49,45%(Tabla 65), indicando que el 49,45% de la variabilidad en el giro de la finura puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. El R-cuadrado predictivo es del 29,66%, lo que sugiere cierta capacidad predictiva.

Coefficientes Significativos(Tabla 66):

La condición y las interacciones condición\*temperatura son significativas estadísticamente (valor  $p < 0,05$ ).

Importancia de los Coeficientes:

Condición:

La condición, tanto con chorro como sin chorro, tiene un efecto significativo en el giro de la finura.

El coeficiente positivo para "CON CHORRO" indica que el giro de la finura aumenta cuando hay chorro en comparación con sin chorro.

Temperatura:

Ninguna de las temperaturas tiene un efecto significativo en el giro de la finura (todos los coeficientes tienen valores  $p > 0,05$ ).

Interacciones Condición\*Temperatura:

Todas las interacciones son significativas, lo que indica que la relación entre la condición y la temperatura tiene un impacto en el giro de la finura.

Interpretación Práctica:

La condición de chorro afecta significativamente el giro de la finura, pero la temperatura por sí sola no tiene un impacto significativo. La interacción entre la condición y la temperatura también influye en el giro de la finura.

### 5.1.11. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: CURVATURA DE LA FINURA(*deg/mm*), CONDICIÓN; TEMPERATURA

En la Tabla 67 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 78).

**Tabla 67 Análisis de varianza Curvatura de la finura.**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	5	474,42	94,88	1,04	0,427
<b>Lineal</b>	3	205,39	68,46	0,75	0,538
<b>Condición</b>	1	59,13	59,13	0,65	0,432
<b>Temperatura</b>	2	146,27	73,13	0,80	0,465
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	269,03	134,52	1,47	0,257
<b>Condición*Temperatura</b>	2	269,03	134,52	1,47	0,257
<b>Error</b>	18	1648,65	91,59		
<b>Total</b>	23	2123,08			

Fuente: Elaboración propia.

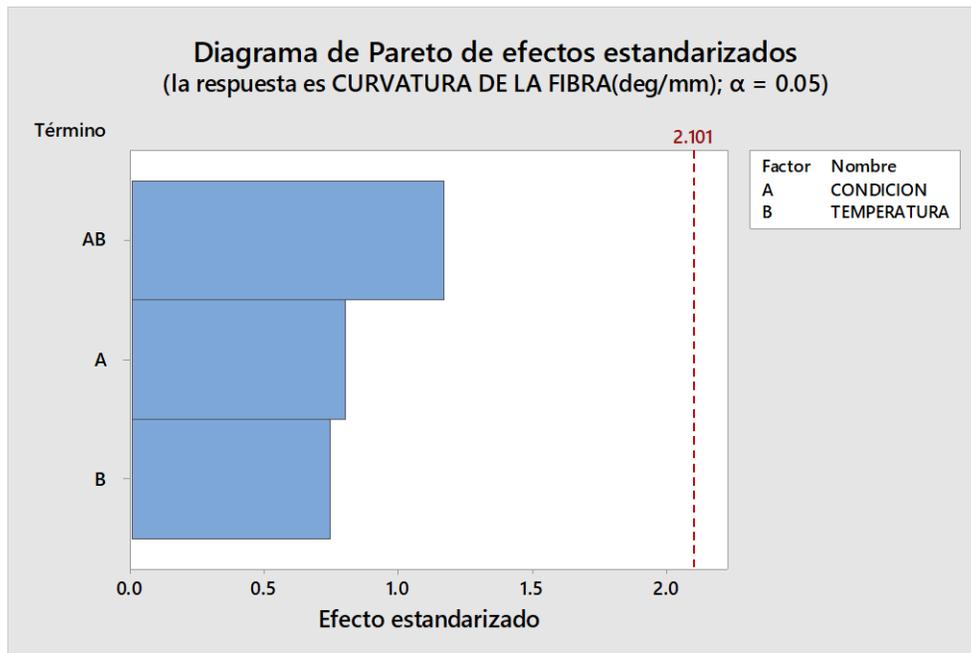
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 68 tendríamos:

**Tabla 68 Hipótesis y criterio para curvatura.**

Hipótesis	Criterio
<b>Ho el factor temperatura no afecta a la curvatura(<i>deg/mm</i>).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta a la curvatura(<i>deg/mm</i>).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta a la curvatura(<i>deg/mm</i>).(nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor condición si afecta a la curvatura(<i>deg/mm</i>).</b>	Rechazo
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta a la curvatura. (<i>deg/mm</i>) (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta a la curvatura(<i>deg/mm</i>).</b>	Rechazo

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 78 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Curvatura de la fibra**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global no es estadísticamente significativo (Valor p = 0,427), lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para afirmar que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con la "Curvatura de la finura".

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal tampoco es significativo (Valor p = 0,538), indicando que no hay evidencia suficiente para afirmar que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor p para la Condición es 0,432, lo que indica que no hay una diferencia significativa en la "Curvatura de la finura" entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor p para la Temperatura es 0,465, indicando que no hay una diferencia significativa en la "Curvatura de la finura" entre las temperaturas de 260, 280 y 300 °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura tampoco es significativa (Valor p = 0,257), indicando que no hay evidencia suficiente

para afirmar que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en la "Curvatura de la finura".

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 69 Resumen del modelo Curvatura**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
9,57036	22,35%	0,78%	0,00%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 70 Coeficientes de análisis (Curvatura)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	61,48	1,95	31,47	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
CON CHORRO	-1,57	1,95	-0,80	0,432	1,00
SIN CHORRO	1,57	1,95	0,80	0,432	*
<b>TEMPERATURA</b>					
260 °C	1,73	2,76	0,63	0,538	1,33
280 °C	1,76	2,76	0,64	0,533	1,33
300 °C	-3,49	2,76	-1,26	0,222	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
CON CHORRO 260 °C	-3,69	2,76	-1,34	0,198	1,33
CON CHORRO 280 °C	-0,72	2,76	-0,26	0,798	1,33
CON CHORRO 300 °C	4,41	2,76	1,60	0,128	*
SIN CHORRO 260 °C	3,69	2,76	1,34	0,198	*
SIN CHORRO 280 °C	0,72	2,76	0,26	0,798	*
SIN CHORRO 300 °C	-4,41	2,76	-1,60	0,128	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{CU(deg/mm)} = & 61,48 - 1,57 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} + 1,57 \text{ CONDICIÓN SIN} \\ & \text{CHORRO} + 1,73 \text{ TEMPERATURA 260} + 1,76 \text{ TEMPERATURA 280} - 3,49 \text{ TEMPERATURA} \\ & \text{300} - 3,69 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO} \quad 260 \\ & - 0,72 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO} \quad 280 \\ & + 4,41 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO} \quad 300 \\ & + 3,69 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO} \quad 260 \\ & + 0,72 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO} \quad 280 \\ & - 4,41 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO 300} \end{aligned}$$

Donde:

Curvatura de la fibra = CU

Aunque se proporciona la ecuación de regresión, se debe tener precaución al interpretarla debido a la falta de significancia estadística en los coeficientes.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado muy bajo del 0,78%(Tabla 69), indicando que solo el 0,78% de la variabilidad en la curvatura de la finura puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. Además, el R-cuadrado predictivo es del 0%, lo que sugiere una capacidad predictiva insignificante.

Coeficientes y Significancia Estadística(Tabla 70):

La condición y las interacciones condición\*temperatura no son significativas estadísticamente (todos los valores  $p > 0,05$ ).

Importancia Práctica:

Dado el bajo R-cuadrado ajustado, los coeficientes no tienen una importancia práctica significativa.

Significancia Práctica:

La falta de significancia estadística indica que el modelo actual no es capaz de proporcionar una explicación significativa de la variabilidad en la curvatura de la finura.

### **5.1.12. REGRESIÓN FACTORIAL GENERAL: PORCENTAJE DE CURVATURA(%); CONDICIÓN; TEMPERATURA.**

En la Tabla 71 se presenta un detallado análisis de varianza, calculado mediante ANOVA, proporcionando información sobre las variaciones existentes en los datos además de proporcionar un análisis de Pareto(Imagen 79).

**Tabla 71 Análisis de varianza Porcentaje de curvatura.**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Modelo</b>	5	154,329	30,866	0,92	0,492
<b>Lineal</b>	3	42,974	14,325	0,43	0,737
<b>Condición</b>	1	8,580	8,580	0,26	0,620
<b>Temperatura</b>	2	34,394	17,197	0,51	0,608
<b>Interacciones de 2 términos</b>	2	111,355	55,678	1,66	0,219
<b>Condición*Temperatura</b>	2	111,355	55,678	1,66	0,219
<b>Error</b>	18	605,140	33,619		
<b>Total</b>	23	759,469			

Fuente: Elaboración propia.

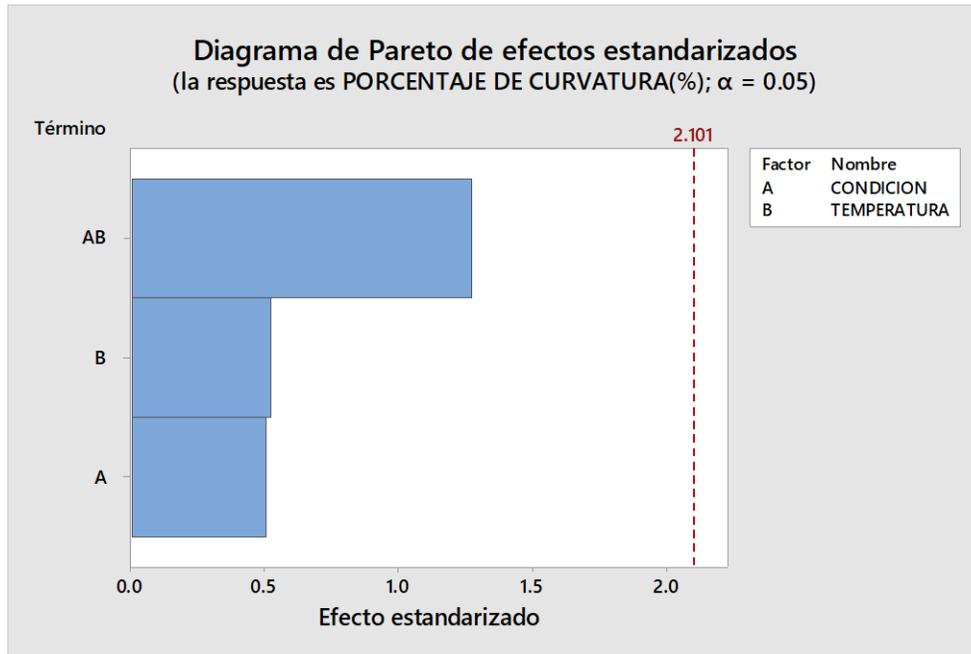
Tomado en cuentas las hipótesis posibles mostradas en la Tabla 72 tendríamos:

**Tabla 72 Hipótesis y criterio para Porcentaje de curvatura.**

<b>Hipótesis</b>	<b>Criterio</b>
<b>Ho el factor temperatura no afecta al porcentaje de curvatura(%). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor temperatura si afecta al porcentaje de curvatura(%).</b>	Rechazo
<b>Ho el factor condición no afecta al porcentaje de curvatura(%). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha el factor condición si afecta al porcentaje de curvatura(%).</b>	Rechazo
<b>Ho la interacción entre el factor condición y temperatura no afecta al porcentaje de curvatura(%). (nula)</b>	Aceptación
<b>Ha la interacción entre el factor temperatura y condición si afecta al porcentaje de curvatura(%).</b>	Rechazo

Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 79 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados Porcentaje de Curvatura.**



Fuente: Elaboración propia.

Modelo Global:

Valor F y Valor p: El modelo global no es estadísticamente significativo (Valor  $p = 0,492$ ), lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para afirmar que al menos una de las variables independientes (Condición, Temperatura o su interacción) está relacionada con el "Porcentaje de curvatura".

Efectos Lineales:

Valor F y Valor p para el modelo lineal: El modelo lineal tampoco es significativo (Valor  $p = 0,737$ ), indicando que no hay evidencia suficiente para afirmar que hay efectos lineales significativos en la relación entre las variables.

Condición:

El valor  $p$  para la Condición es  $0,620$ , lo que indica que no hay una diferencia significativa en el "Porcentaje de curvatura" entre las condiciones con chorro y sin chorro.

Temperatura:

El valor  $p$  para la Temperatura es  $0,608$ , indicando que no hay una diferencia significativa en el "Porcentaje de curvatura" entre las temperaturas de  $260$ ,  $280$  y  $300$  °C.

Interacciones de 2 Términos:

Valor F y Valor p para la interacción Condición\*Temperatura: La interacción entre Condición y Temperatura tampoco es significativa (Valor  $p = 0,219$ ), indicando que no hay evidencia suficiente

para afirmar que la combinación de Condición y Temperatura tiene un efecto conjunto significativo en el "Porcentaje de curvatura".

Error:

Grados de Libertad (GL) y Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.): Representa la variabilidad no explicada por el modelo. Un menor SC Ajust. indica que el modelo está explicando bien la variabilidad en los datos.

**Tabla 73 Resumen del modelo Porcentaje de curvatura.**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
5,79818	20,32%	0,00%	0,00%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 74 Coeficientes de análisis (%CU)**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
<b>Constante</b>	69,73	1,18	58,92	0,000	
<b>CONDICIÓN</b>					
<b>CON CHORRO</b>	-0,60	1,18	-0,51	0,620	1,00
<b>SIN CHORRO</b>	0,60	1,18	0,51	0,620	*
<b>TEMPERATURA</b>					
<b>260 °C</b>	0,40	1,67	0,24	0,813	1,33
<b>280 °C</b>	1,22	1,67	0,73	0,474	1,33
<b>300 °C</b>	-1,62	1,67	-0,97	0,344	*
<b>CONDICIÓN*TEMPERATURA</b>					
<b>CON CHORRO 260 °C</b>	-2,64	1,67	-1,58	0,132	1,33
<b>CON CHORRO 280 °C</b>	0,00	1,67	0,00	0,999	1,33
<b>CON CHORRO 300 °C</b>	2,64	1,67	1,58	0,133	*
<b>SIN CHORRO 260 °C</b>	2,64	1,67	1,58	0,132	*
<b>SIN CHORRO 280 °C</b>	-0,00	1,67	-0,00	0,999	*
<b>SIN CHORRO 300 °C</b>	-2,64	1,67	-1,58	0,133	*

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación de regresión

$$\%CU = 69,73 - 0,60 \text{ CONDICIÓN CON CHORRO} + 0,60 \text{ CONDICIÓN SIN CHORRO} + 0,40 \text{ TEMPERATURA } 260 + 1,22 \text{ TEMPERATURA } 280 - 1,62 \text{ TEMPERATURA } 300 - 2,64 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 260 + 0,00 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 280 + 2,64 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA CON CHORRO } 300 + 2,64 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 260 - 0,00 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 280 - 2,64 \text{ CONDICIÓN*TEMPERATURA SIN CHORRO } 300$$

Donde:

Porcentaje de curvatura =%CU

Aunque se proporciona la ecuación de regresión, la falta de significancia estadística en los coeficientes indica que la interpretación de la ecuación debe realizarse con precaución.

El modelo tiene un R-cuadrado ajustado muy bajo del 0,00%(Tabla 73), indicando que el modelo no explica prácticamente ninguna variabilidad en el porcentaje de curvatura. El R-cuadrado predictivo también es del 0%.

Coefficientes y Significancia Estadística(Tabla 74):

Ninguno de los coeficientes, incluyendo la condición, la temperatura y sus interacciones, es significativo estadísticamente (todos los valores  $p > 0,05$ ).

Importancia Práctica:

Dado el R-cuadrado ajustado insignificante, los coeficientes no tienen importancia práctica significativa.

Significancia Práctica:

La falta de significancia estadística indica que el modelo actual no es capaz de proporcionar una explicación significativa de la variabilidad en el porcentaje de curvatura.

## 5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

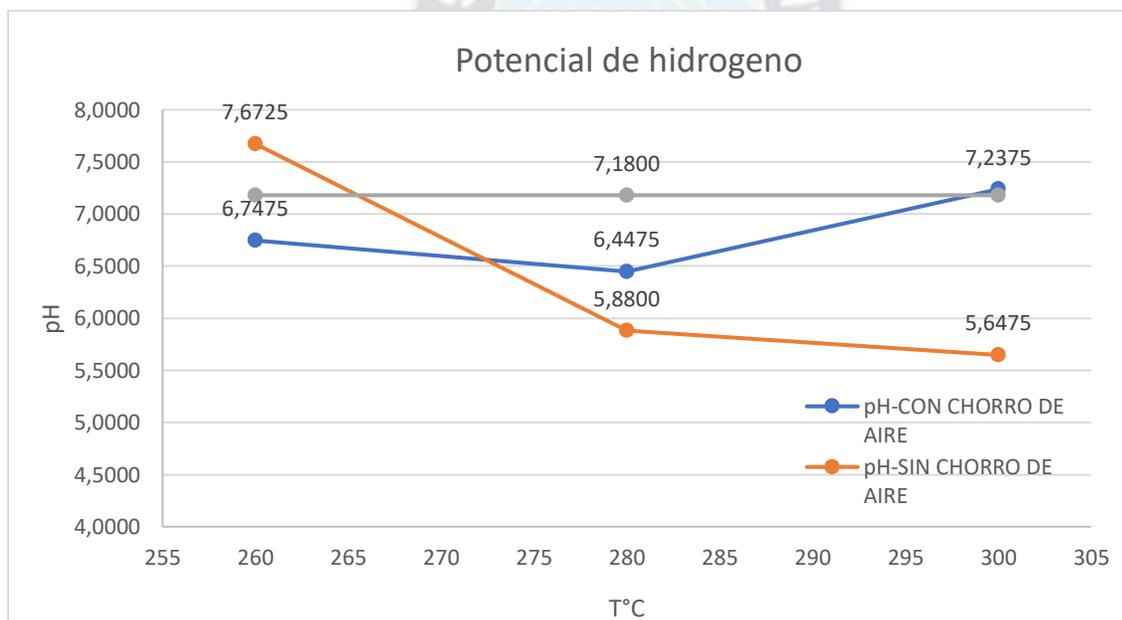
Para llevar a cabo un análisis exhaustivo, se generaron gráficas comparativas y diagramas de barras para analizar el error porcentual de cada condición de fibra RPET con la fibra de poliéster. Los resultados obtenidos por el análisis comparativo son los siguientes.

Donde: PL= Poliéster

### 5.2.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POTENCIAL DE HIDROGENO(PH) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER

En la Imagen 80, se aprecia la comparación para el pH, donde se observa claramente que las fibras RPET mejoradas con chorro de aire muestran valores más cercanos a los de la fibra de poliéster. Además, se evidencia una tendencia más neutra, lo cual es altamente relevante para su aplicación en el área textil.

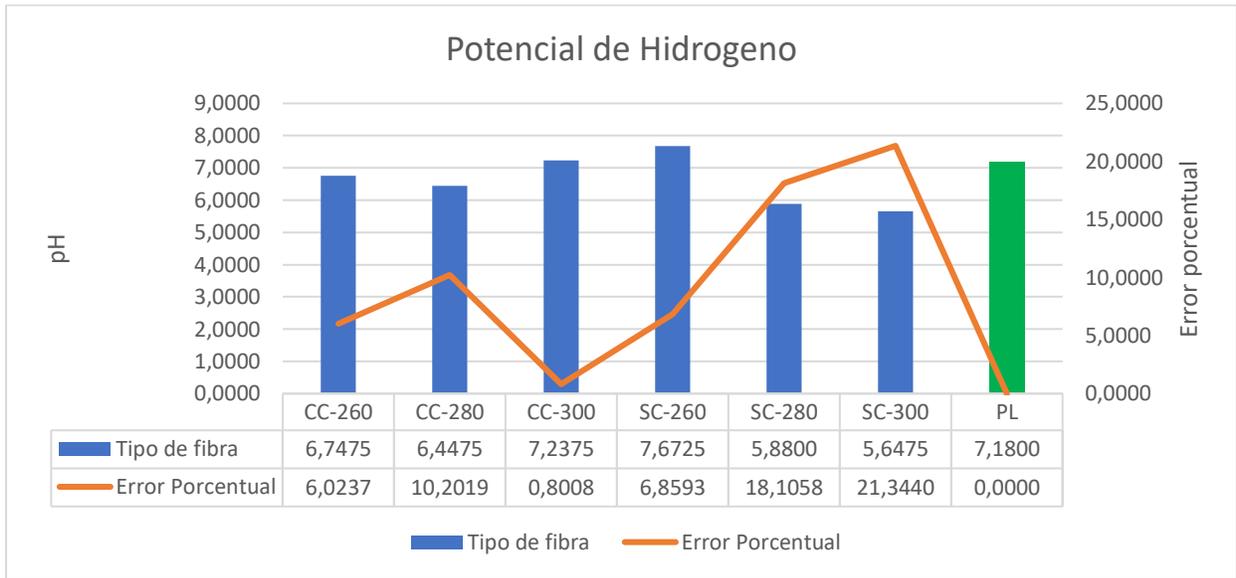
**Imagen 80 Comparación de pH entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 81, se aprecia claramente el error porcentual de las fibras RPET en comparación con el poliéster. Cuanto menor sea este tipo de error, mayor similitud presenta con la fibra de referencia. La fibra bajo la condición de chorro de aire elaborada a una temperatura de 300°C muestra un error porcentual del 0.8%, colocándola en proximidad con la fibra de referencia.

**Imagen 81 Error Porcentual pH.**



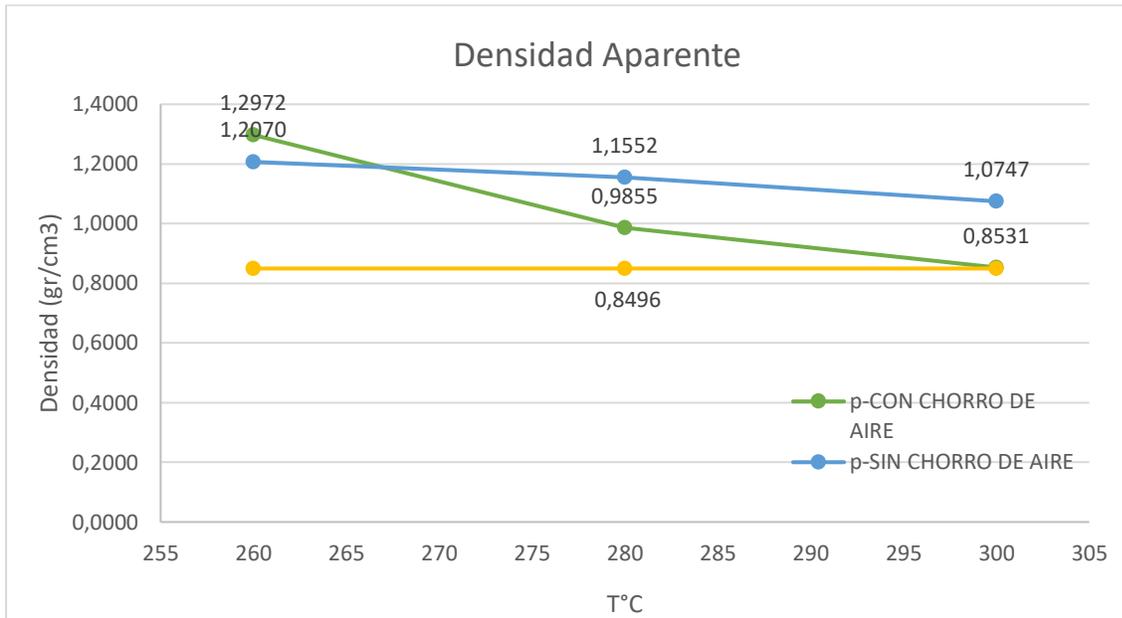
Fuente: Elaboración propia.

El conformado de la fibra a una temperatura de 300°C, con un enfriamiento rápido mediante chorro de aire, resulta en un bajo índice de error porcentual. Este proceso evita la degradación del polímero por combustión, lo que se traduce en valores de pH con una tendencia neutral. Este fenómeno es de gran relevancia, ya que un pH neutro en las fibras textiles no solo contribuye a su confort, sino que también indica una mayor estabilidad química.

### **5.2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DENSIDAD( $g/cm^3$ ) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER**

En la Imagen 82, se observa una comparación detallada de la densidad aparente, donde se destaca claramente que las fibras RPET mejoradas con chorro de aire exhiben valores más cercanos a los de las fibras de poliéster. La expansión mediante chorro de aire resulta en fibras más delgadas, lo que, en un volumen determinado, incorpora una mayor cantidad de masa, un parámetro que se asemeja al comportamiento de las fibras de poliéster.

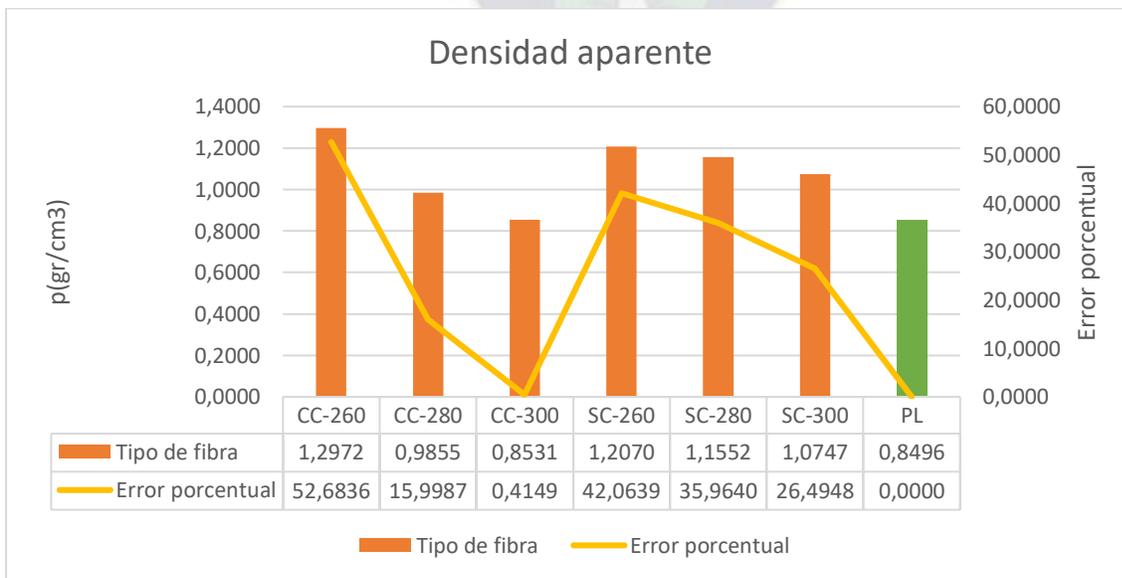
**Imagen 82 Comparación de densidad aparente entre fibra RPET- poliéster.**



Fuente: Elaboración propia.

Al examinar la Imagen 83, se evidencia el error porcentual de las fibras RPET en comparación con la fibra de poliéster. Observamos que la fibra producida bajo la condición de chorro de aire a una temperatura de 300°C presenta un error porcentual del 0.41%, situándola en proximidad con la fibra de referencia.

**Imagen 83 Error porcentual densidad aparente.**



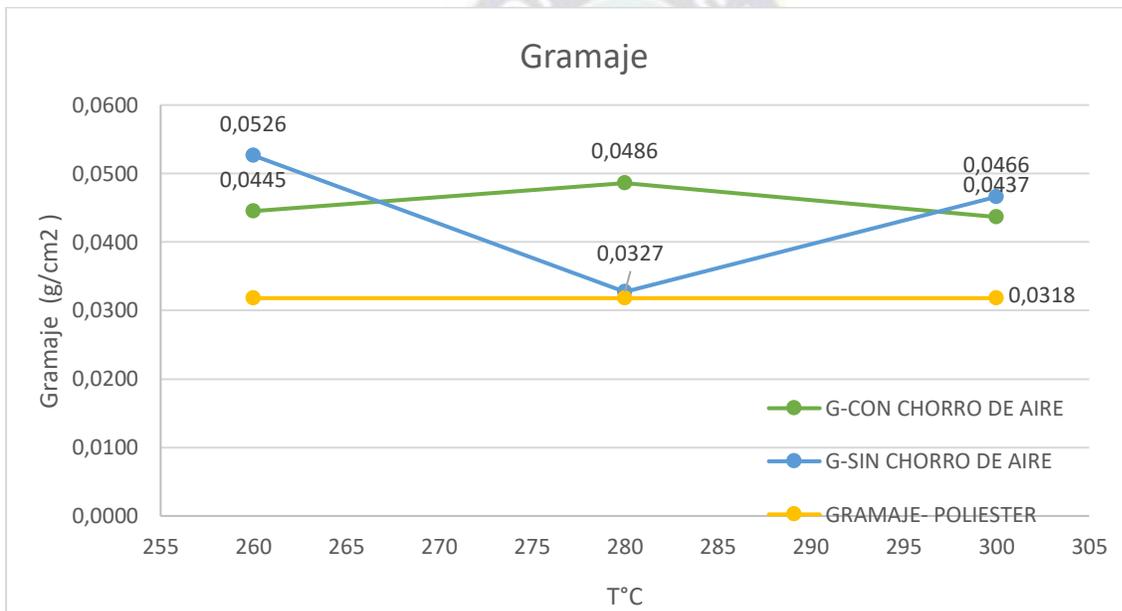
Fuente: Elaboración propia.

El conformado de la fibra a una temperatura de 300°C, seguido de un enfriamiento rápido mediante chorro de aire, conduce a un bajo índice de error porcentual. Este procedimiento incrementa la cantidad de masa en un volumen específico, lo que se refleja en valores de densidad.

### 5.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL GRAMAJE( $g/cm^2$ ) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER

En la Imagen 84, se observa una comparación detallada del gramaje, donde se destaca claramente que las fibras RPET mejoradas sin chorro de aire exhiben valores más cercanos a los de las fibras de poliéster.

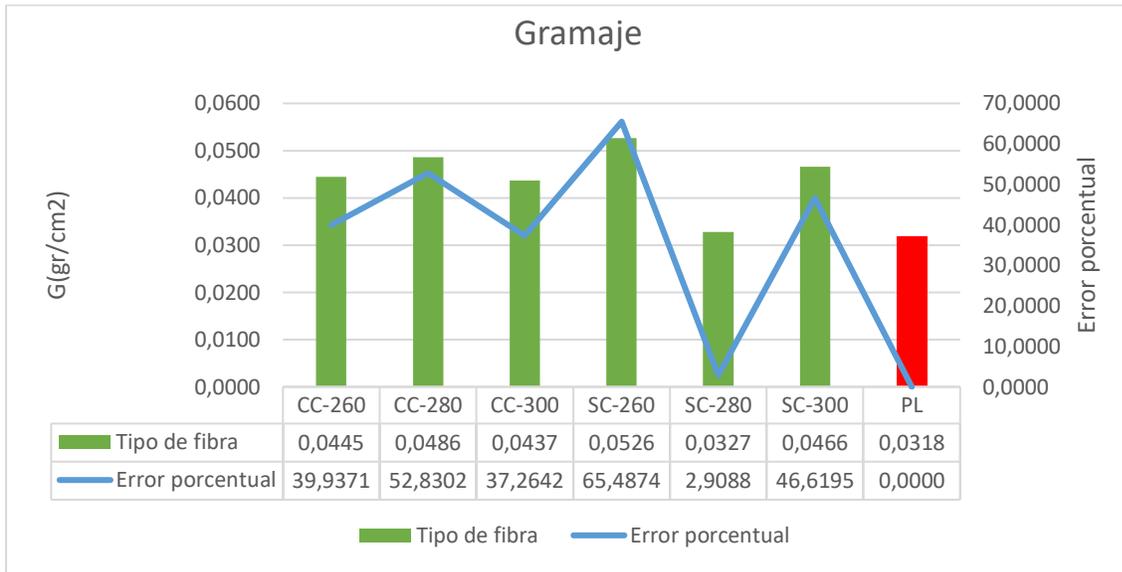
**Imagen 84 Comparación de gramaje entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia

Al analizar la Imagen 85, se evidencia el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. Un menor error porcentual indica una mayor similitud con la fibra de referencia. Es notable que la fibra elaborada sin chorro de aire a una temperatura de 280°C presenta un error porcentual del 2.90%, colocándola en proximidad con la fibra de referencia.

**Imagen 85 Error porcentual gramaje.**

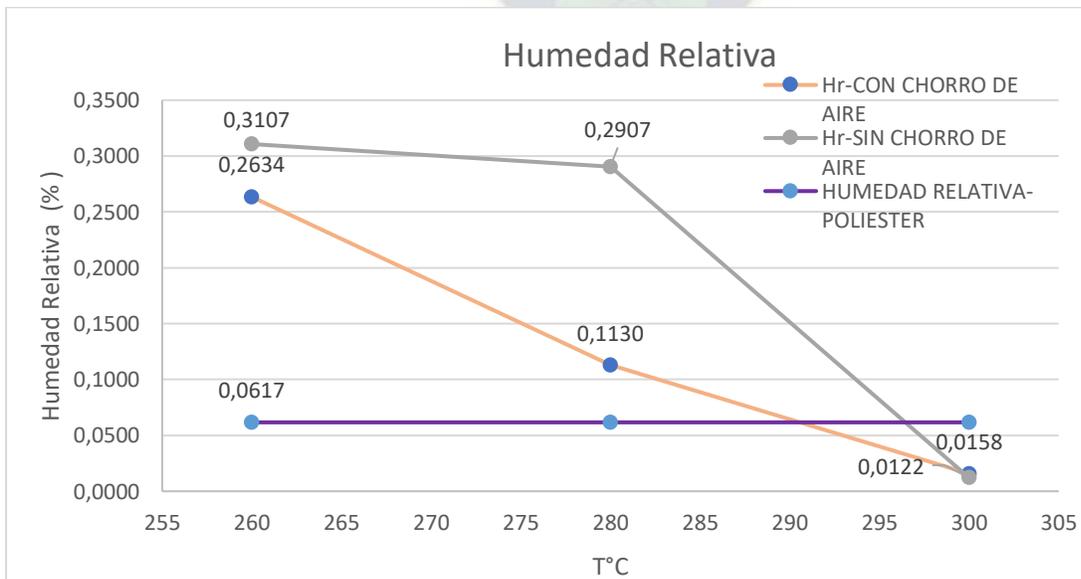


Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE HUMEDAD RELATIVA (%) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER

En la Imagen 86, se realiza una comparación detallada de la humedad relativa, destacando que las fibras RPET mejoradas con chorro de aire exhiben valores más cercanos a los de las fibras de poliéster.

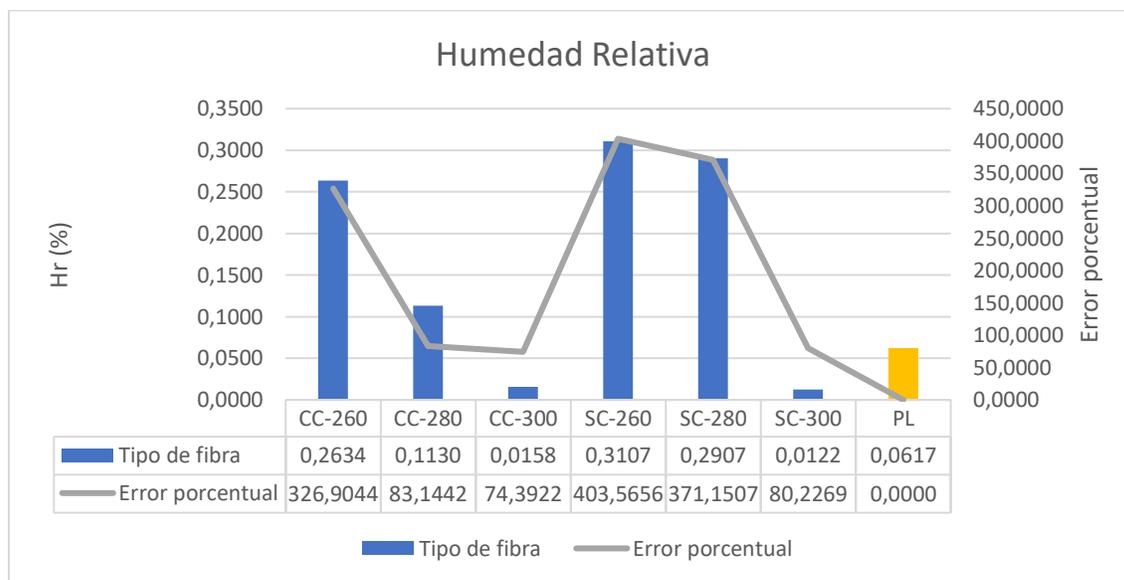
**Imagen 86 Comparación de humedad relativa entre fibra RPET- poliéster.**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 87, se evidencia de manera clara el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. Un menor error porcentual indica una mayor similitud con la fibra de referencia. Es notable que la fibra, producida sin chorro de aire como con chorro de aire, elaborada a una temperatura de 300°C exhibe un error porcentual del 0.02% en ambos casos, lo que sugiere que este valor no depende de la condición de producción, sino exclusivamente de la temperatura.

**Imagen 87 Error porcentual humedad relativa.**



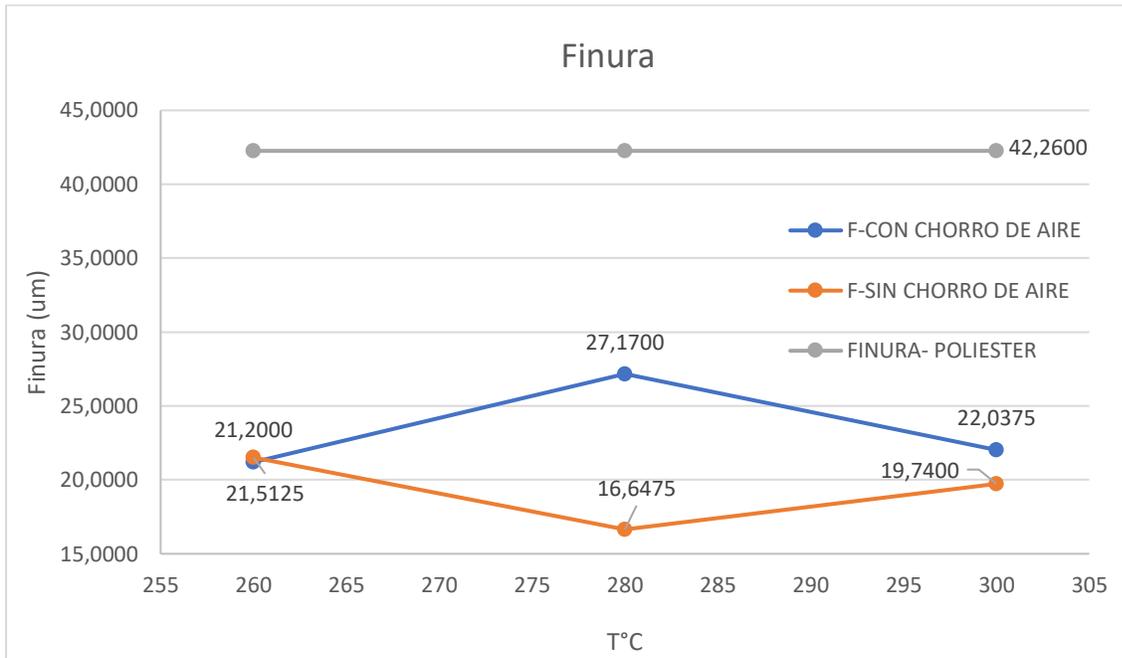
Fuente: Elaboración propia.

El error porcentual del 0.02% en la humedad relativa, independientemente de la condición de producción (con o sin chorro de aire), sugiere una consistencia excepcional en la capacidad de las fibras RPET para mantener una humedad relativa similar a la de las fibras de poliéster. Este fenómeno está vinculado a la estabilidad de las fibras RPET en condiciones de temperatura elevada.

### **5.2.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE FINURA( $F$ ), PORCENTAJE EN FINURA EN MUESTRA( $\%F$ ), COEFICIENTE DE VARIACIÓN( $CV$ ), EXTREMO MÁS LARGO ( $CEM$ ), FACTOR CONFORT( $FC$ ), GIRO DE FINURA( $GF$ ), CURVATURA DE LA FINURA( $CU$ ) Y PORCENTAJE DE CURVA( $\%CU$ ) DE FIBRA RPET CON CONDICIÓN DE CHORRO DE AIRE-FIBRA DE POLIÉSTER**

Los ensayos de caracterización de finura( $F$ ), porcentaje en finura en muestra( $\%F$ ), coeficiente de variación( $CV$ ), extremo más largo ( $CEM$ ), factor confort( $FC$ ), Giro de finura( $GF$ ), curvatura de la finura( $CU$ ) y porcentaje de curva( $\%CU$ ) son análisis exclusivos para fibras textiles.

**Imagen 88 Comparación de Finura(F) entre fibra RPET- poliéster**

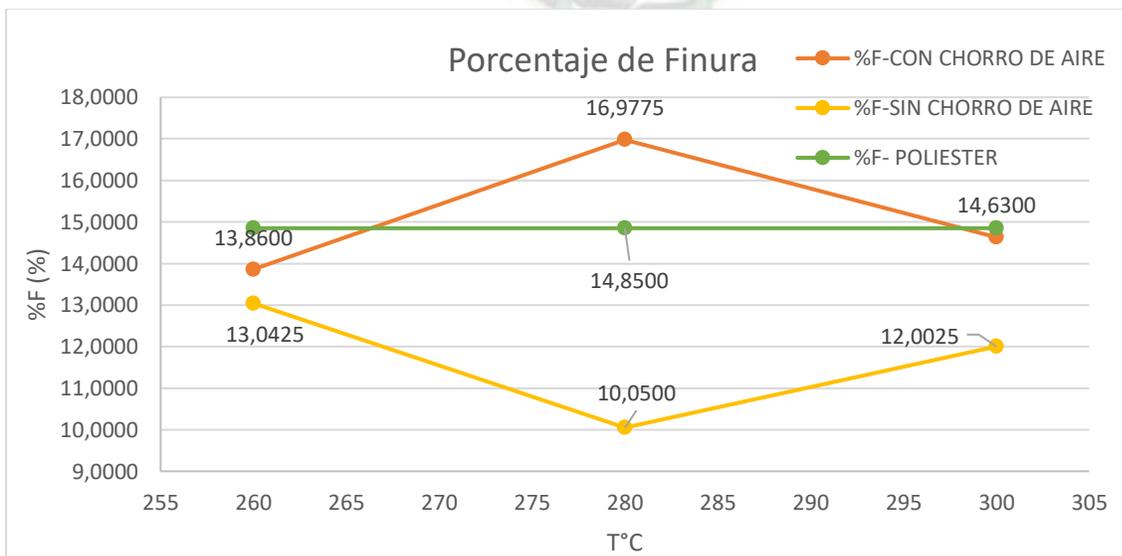


Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 88 se muestra que las fibras RPET con chorro de aire muestran valores de finura (um) que están más cercanos a las fibras de poliéster.

La condición SC-280 tiene la finura más baja sin chorro de aire, lo que podría indicar una menor calidad en términos de delgadez de la fibra.

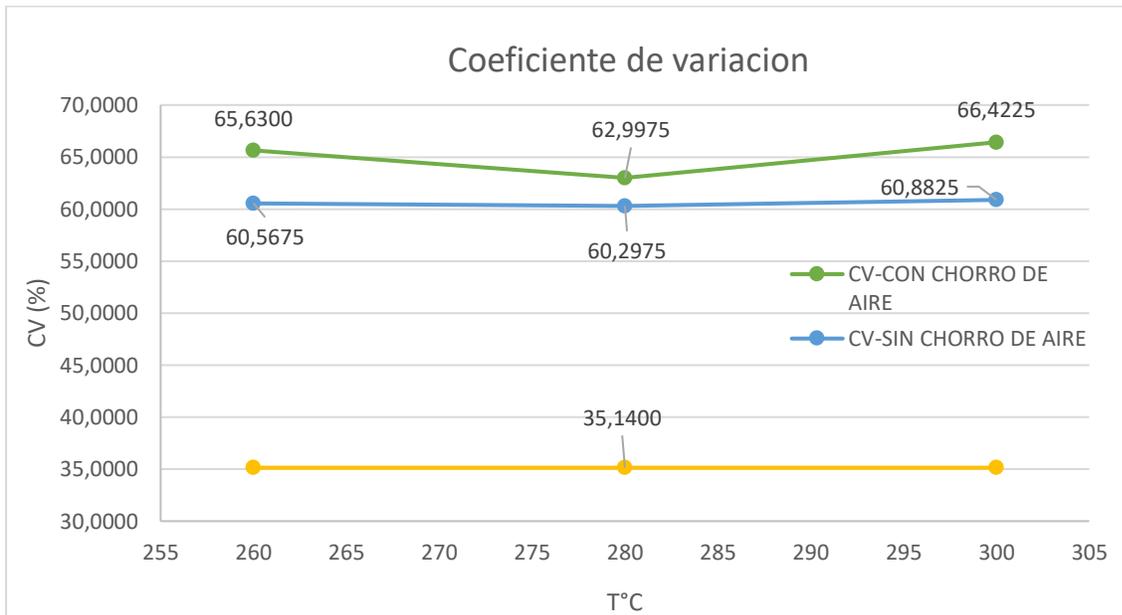
**Imagen 89 Comparación de porcentaje en finura en muestra(%F) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 89, se observa que el porcentaje de finura presenta una variación considerable. Las fibras RPET tienden a exhibir un porcentaje de finura más alto que las fibras de poliéster, y se destaca que la fibra tratada con chorro de aire muestra una mayor cercanía a la comparada.

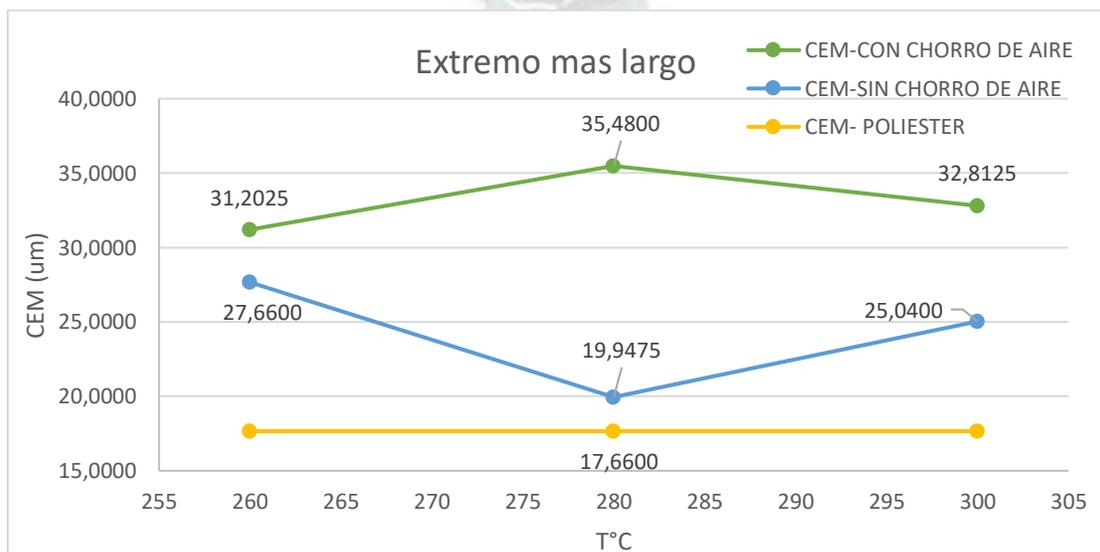
**Imagen 90 Comparación de coeficiente de variación(CV) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 90 se aprecia que el coeficiente de variación indica la dispersión de las fibras. En general, las fibras RPET presentan un CV más alto que las de poliéster, lo que sugiere una mayor variabilidad en la finura de las fibras RPET.

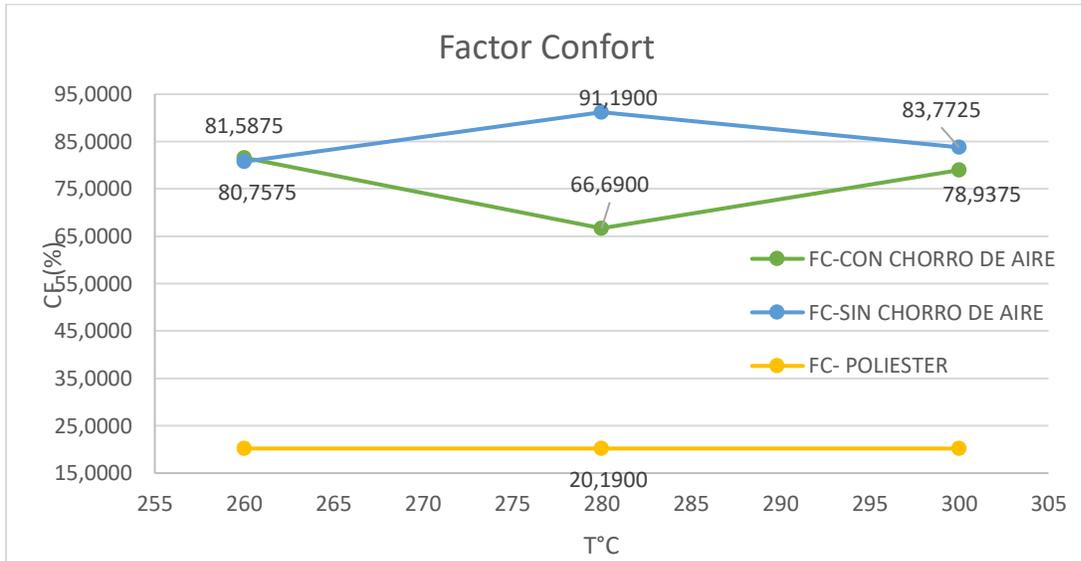
**Imagen 91 Comparación de extremo más largo (CEM) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 91 se ve que las fibras RPET tienden a tener extremos más gruesos en comparación con las de poliéster. La condición SC-260 sin chorro de aire muestra la mayor diferencia en extremo más grueso.

**Imagen 92 Comparación de factor confort (FC) entre fibra RPET- poliéster**

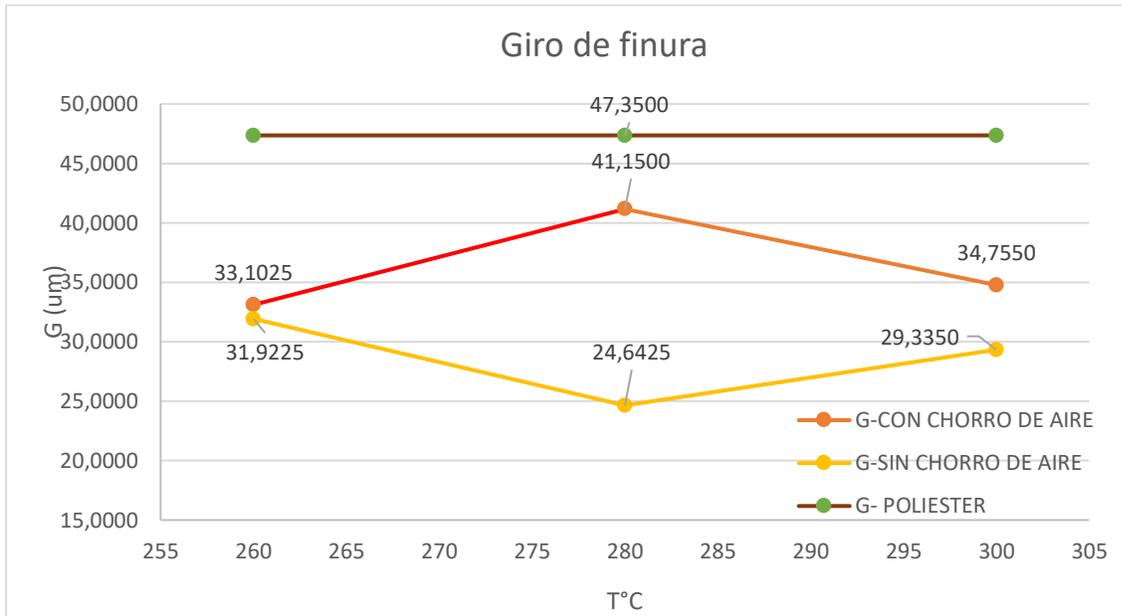


Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 92, se observa que el factor confort es sustancialmente más alto para las fibras RPET en comparación con las de poliéster, indicando posiblemente una menor comodidad en textiles producidos con fibras RPET.

El factor de confort de la fibra sin chorro de aire muestra una mayor cercanía a la fibra de poliéster, aunque los valores son considerablemente distantes. Este resultado sugiere que, aunque la aplicación de chorro de aire a las fibras RPET puede mejorar el factor de confort, aún hay una notoria diferencia con las fibras de poliéster.

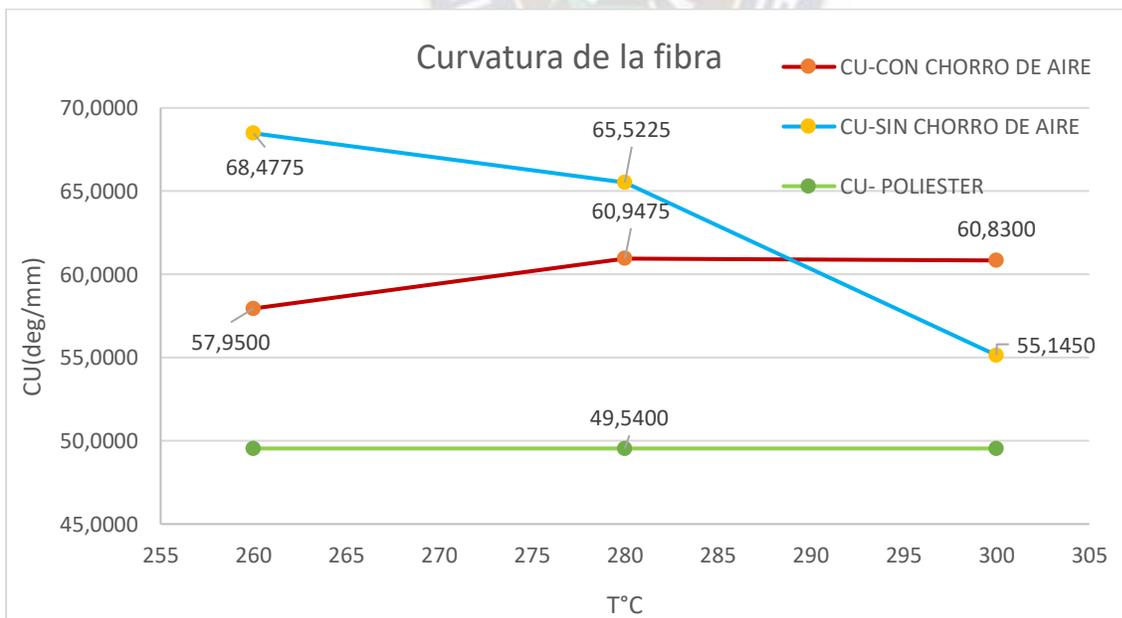
**Imagen 93 Comparación de Giro de finura(GF) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 93 se ve que las fibras RPET tienen valores de giro de finura más bajos que las de poliéster, indicando posiblemente una menor torsión en las fibras RPET.

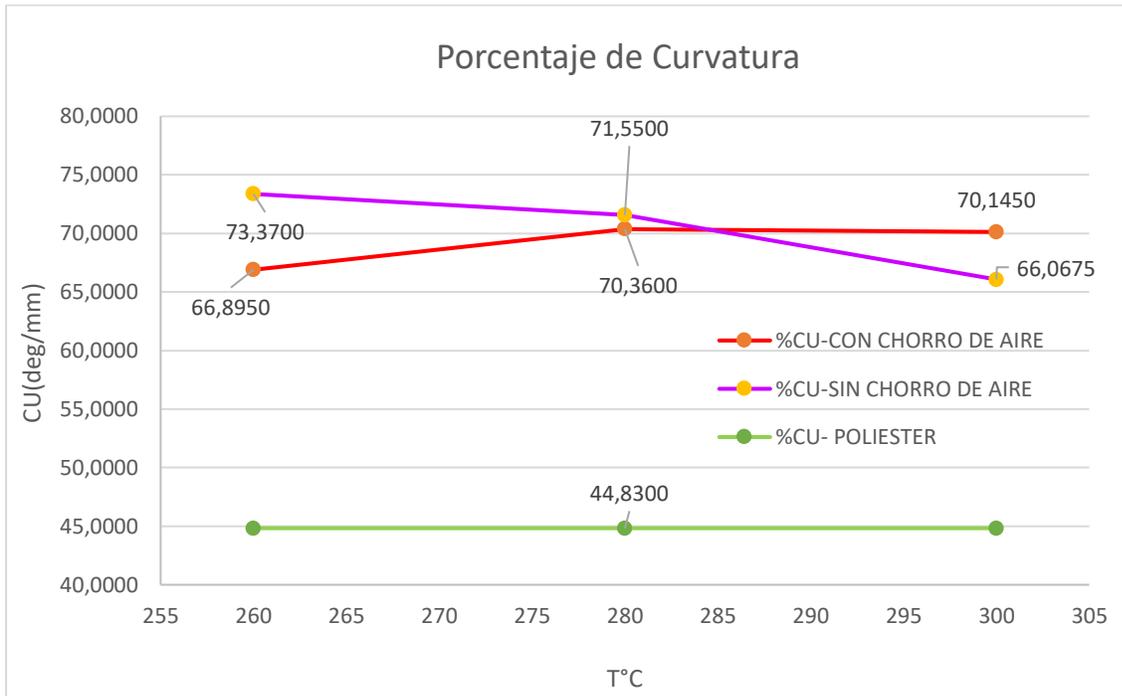
**Imagen 94 Comparación de curvatura de la finura(CU) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 94 se logra apreciar que las fibras RPET tienden a tener valores de curvatura de la finura más bajos que las de poliéster, sugiriendo una menor curvatura en las fibras RPET.

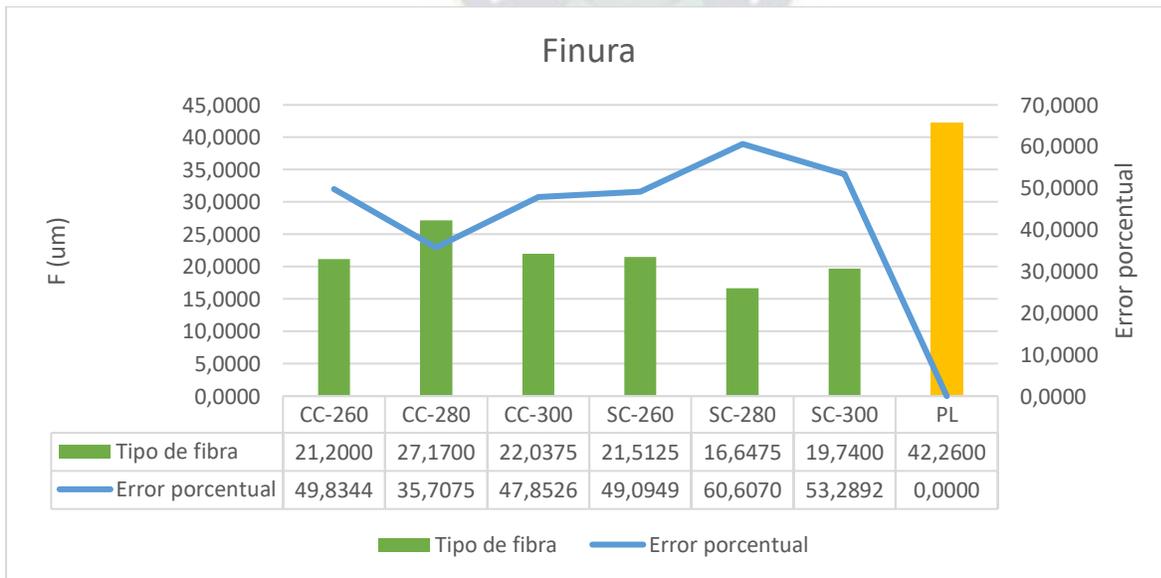
**Imagen 95 Comparación de porcentaje de curvatura(%CU) entre fibra RPET- poliéster**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 95 se ve que las fibras RPET tienen un porcentaje de curvatura más bajo en comparación con las de poliéster, indicando una menor cantidad de curvatura en las fibras RPET.

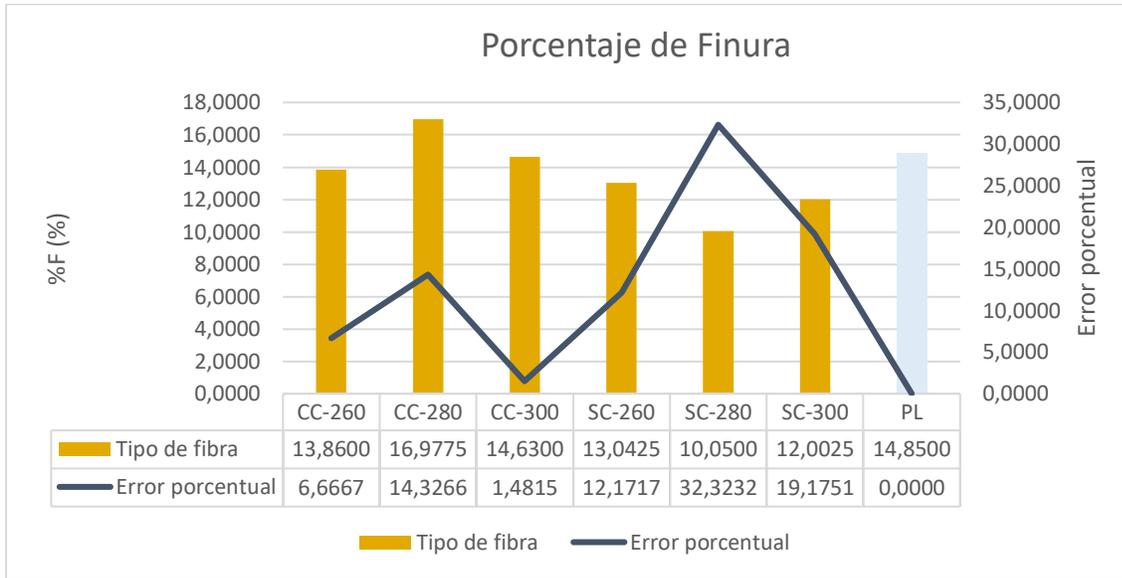
**Imagen 96 Error porcentual de Finura(F)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 96, se observa el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra elaborada con chorro de aire a una temperatura de 280°C exhibe un error porcentual del 35.70%, mostrando mayor proximidad con la fibra de referencia.

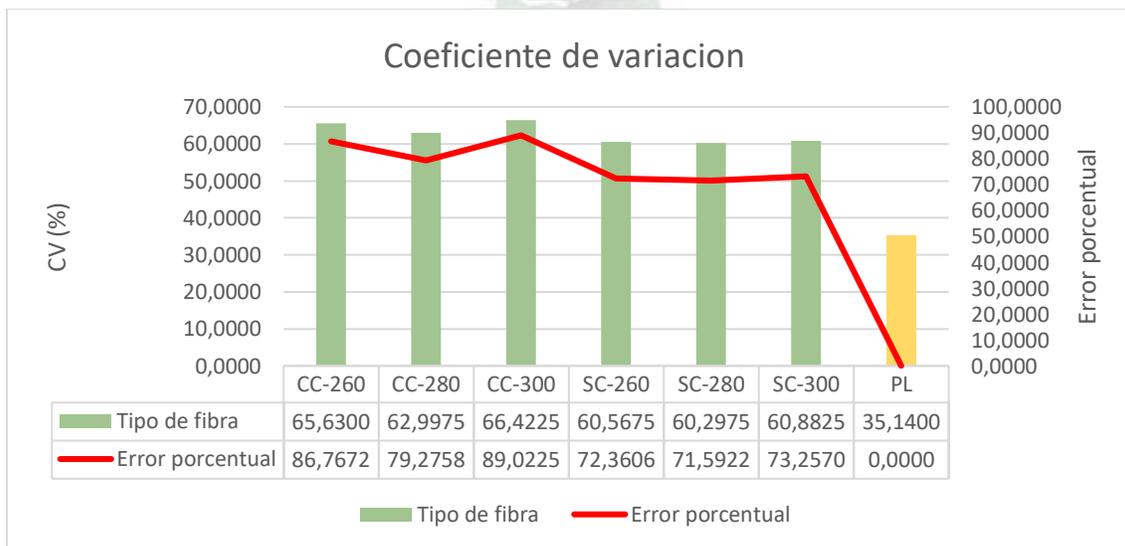
**Imagen 97 Error porcentual de (%F)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 97, se evidencia el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra producida con chorro de aire a una temperatura de 300°C presenta un error porcentual del 1.48%, este error nos indica que existe una mayor proximidad de este tipo de fibra con la de referencia.

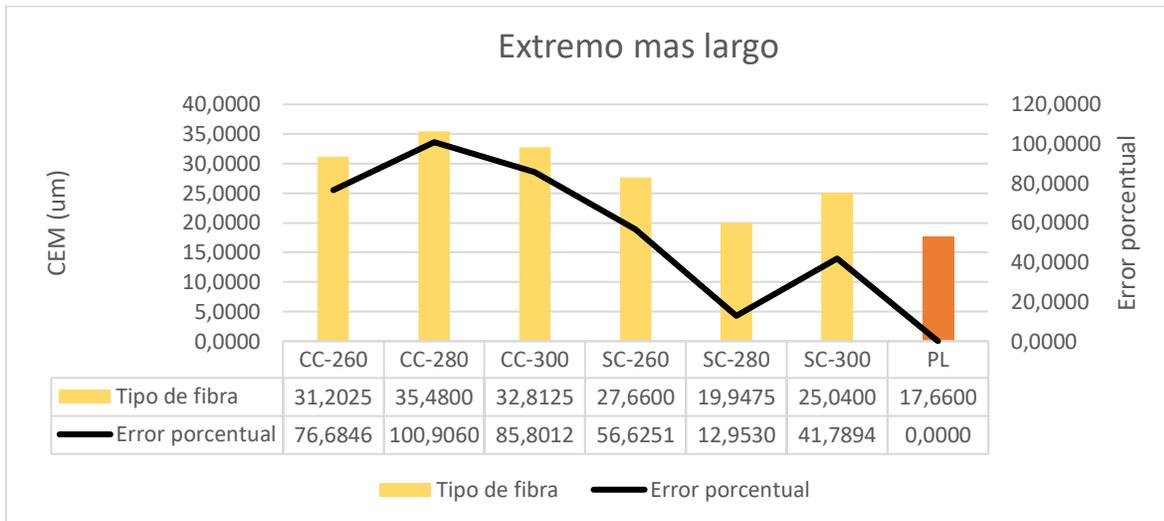
**Imagen 98 Error porcentual de coeficiente de variación(CV)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 98, se logra apreciar que la fibra elaborada bajo la condición de sin chorro de aire a una temperatura de 280°C presenta un error porcentual del 71.59%, que representa el error más bajo.

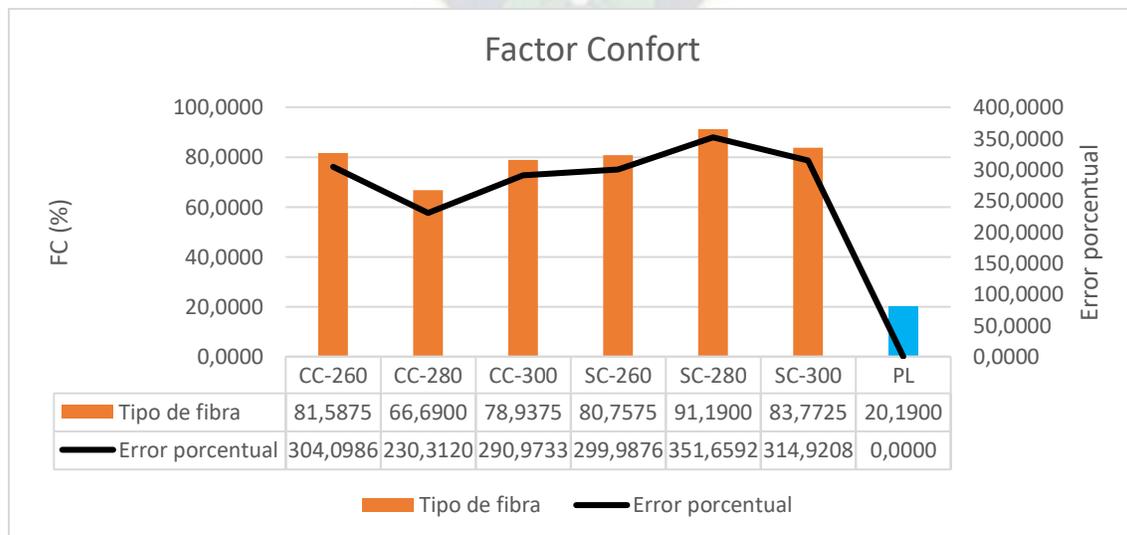
**Imagen 99 Error porcentual de extremo más largo (CEM)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 99, se evidencia el error porcentual para el CEM de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra producida sin chorro de aire a una temperatura de 280°C presenta un error porcentual del 12.95%, este error nos indica que existe una mayor proximidad de este tipo de fibra con la de referencia

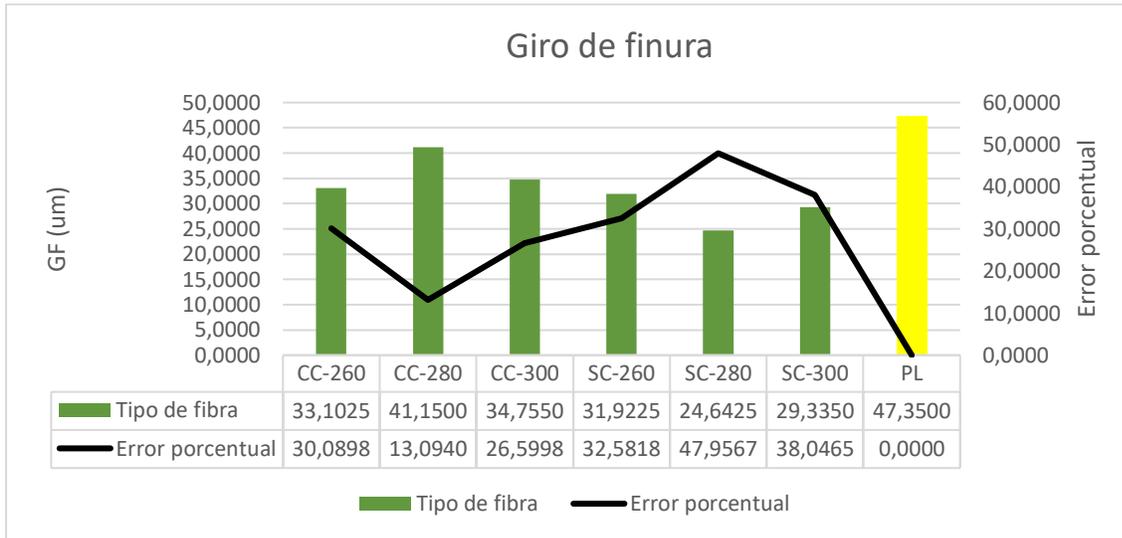
**Imagen 100 Error porcentual de factor confort**



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Imagen 100, se evidencia el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra elaborada bajo la condición con chorro de aire a una temperatura de 280°C muestra una mayor proximidad con la fibra de referencia. Sin embargo, los errores son muy grandes, por lo cual es un valor que no puede ser analizado de forma precisa.

**Imagen 101 Error porcentual de Giro de finura(GF)**

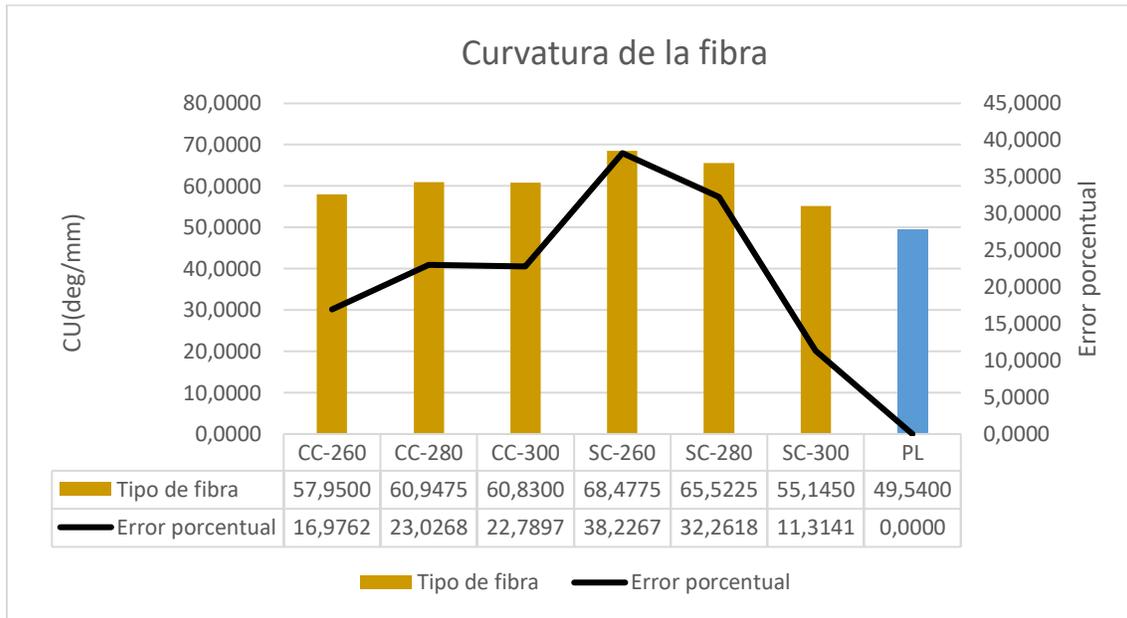


Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Imagen 101, se evidencia el error porcentual de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra elaborada bajo la condición con chorro de aire a una temperatura de 280°C presenta un error porcentual del 13.09%, con mayor proximidad con la fibra de referencia.

En la Imagen 101, se evidencia el error porcentual para el GF de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra producida con chorro de aire a una temperatura de 280°C presenta un error porcentual del 13.09%, este error nos indica que existe una mayor proximidad de este tipo de fibra con la de referencia.

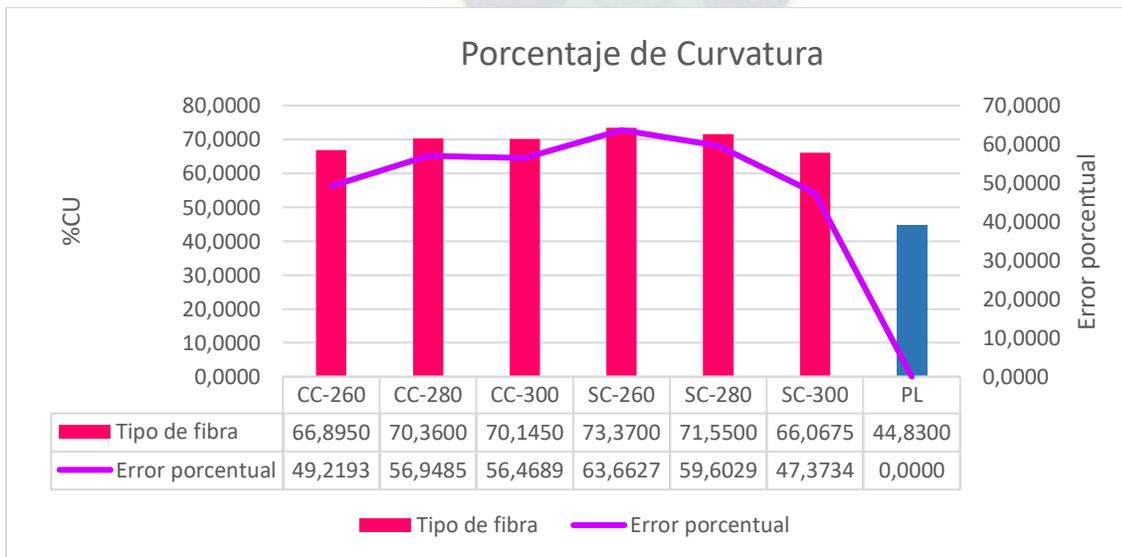
**Imagen 102 Error porcentual de curvatura de la finura(CU)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 102, se evidencia el error porcentual para la CU de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra producida con chorro de aire a una temperatura de 260°C presenta un error porcentual del 16.97%, este error nos indica que existe una mayor proximidad de este tipo de fibra con la de referencia.

**Imagen 103 Error porcentual de (%CU)**



Fuente: Elaboración propia.

En la Imagen 103, se evidencia el error porcentual para la %CU de las fibras RPET en comparación con las de poliéster. La fibra producida sin chorro de aire a una temperatura de 300°C presenta un error porcentual del 47.37%, este error nos indica que existe una mayor proximidad de este tipo de fibra con la de referencia.

### 5.3. RESULTADOS Y CÁLCULOS DE FRACCIÓN DE MATERIA CRISTALINA ( $\alpha$ )

En base a la fórmula de la ecuación de Daubeny, Bunn y Brown, se calcularon los valores de ( $\alpha$ ) para evaluar la cristalinidad de las fibras obtenidas, como se puede observar en la Tabla 15.

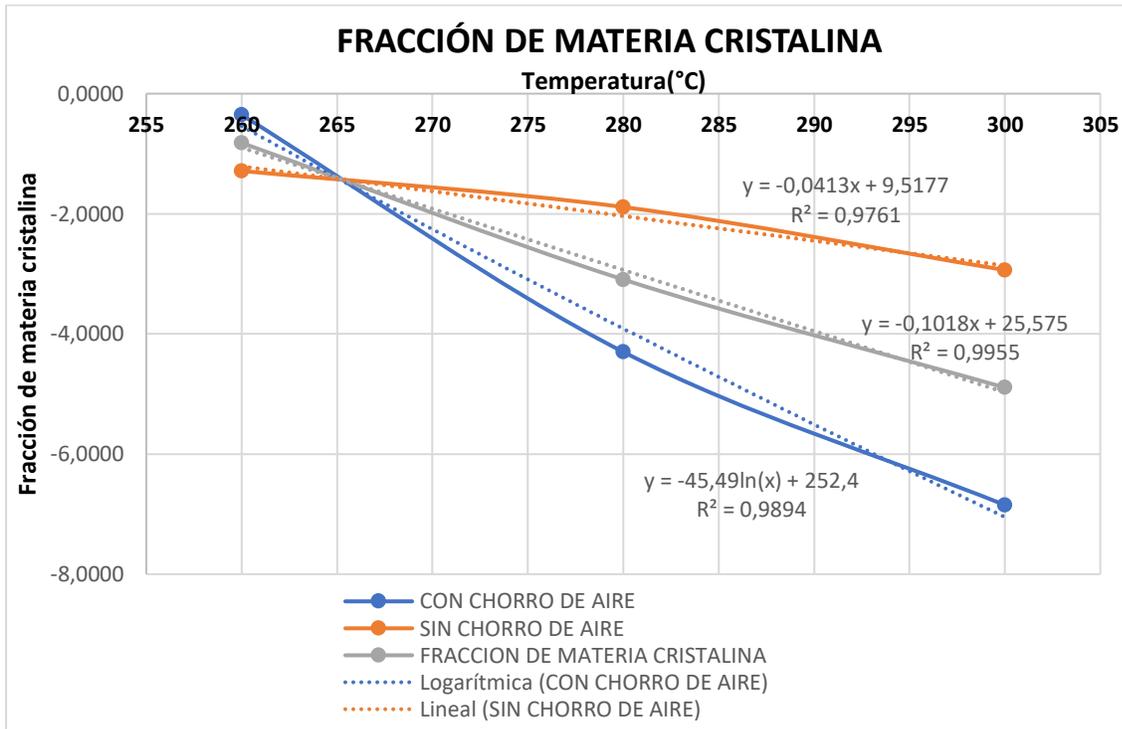
**Tabla 75 Fracción de materia cristalina.**

CONDICIÓN CC-SC	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD ( $\frac{g}{cm^3}$ )	FRACCIÓN DE MATERIA CRISTALINA ( $\alpha$ )
CC	260	6,7475	-0,3533
CC	280	6,4475	-4,2996
CC	300	7,2375	-6,8486
SC	260	7,6725	-1,2861
SC	280	5,8800	-1,8878
SC	300	5,6475	-2,9368

Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos se realizaron los gráficos comparativos para observar el comportamiento de la fracción de materia cristalina con la temperatura (Imagen 104).

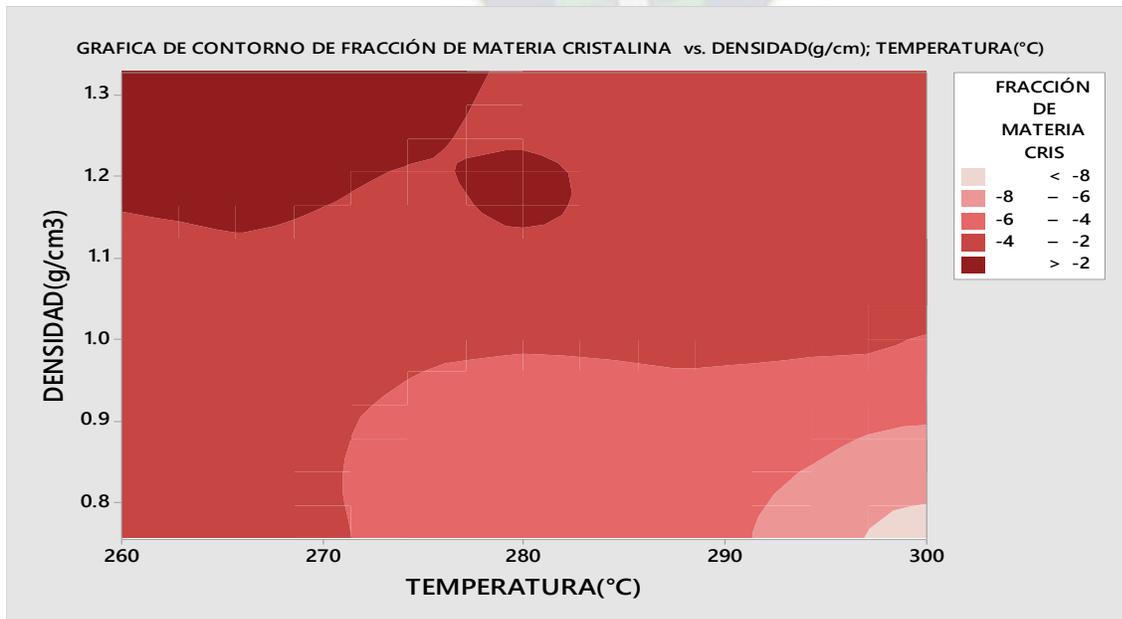
**Imagen 104 Fracción de materia cristalina.**



Fuente: Elaboración propia.

Con los valores calculados, podemos realizar un diagrama de contorno en función de la densidad, temperatura y fracción de materia cristalina, como se aprecia en la Imagen 105.

**Imagen 105 Grafica de contorno de fracción de materia cristalina.**



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. RESULTADOS DE APLICACIÓN

Se realizó un análisis exhaustivo de la aplicación complementaria para las fibras RPET conformadas con una temperatura de 280°C, producida sin chorro de aire (considerada la más adecuada según los análisis anteriores). Este análisis, se llevó a cabo en un proceso de conformado mediante fieltro húmedo, dando como resultado piezas rectangulares de dimensiones 0.2x0.2 m<sup>2</sup>. Los ensayos de caracterización se centraron en los coeficientes de reducción de ruido y en la resistencia térmica.

Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización se muestran en la Tabla 76:

**Tabla 76 Caracterización de fibra con fieltro húmedo**

ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN	RESULTADO	DATOS DEL EXPERIMENTO	PARÁMETRO
Coefficiente de reducción de ruido(NRC)	$NRC = 0,21$	ANEXO 1 COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE RUIDO.	Sonoro
Resistencia Térmica (R)	$R = 0,12 \frac{m^2 K}{W}$	ANEXO 2 RESISTENCIA TÉRMICA.	Térmico

Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

Una vez realizado el estudio sobre el efecto de la temperatura de conformado en las propiedades de la fibra de tereftalato de polietileno reciclado (RPET) durante el proceso de hilado centrífugo fundido, se llegó a la conclusión que la temperatura de conformado en el proceso de hilado centrífugo fundido tiene una influencia significativa en las propiedades de la densidad aparente y la humedad relativa.

La interacción de la temperatura con su condición (CC-SC) presenta una mayor significancia en las propiedades del potencial de hidrógeno y gramaje.

La hipótesis planteada se cumple con respecto a las propiedades de densidad aparente, humedad relativa, potencial de hidrógeno y gramaje.

Se logró concluir que la temperatura no tiene una influencia significativa en las propiedades de finura, porcentaje de finura, coeficiente de variación, extremo más largo, factor de confort y giro de finura que depende de la condición (CC-SC). De igual forma, la temperatura no tiene influencia en las propiedades de curvatura de fibra y porcentaje de curvatura que no dependen de las variables independientes estudiadas.

Se concluyó que la fibra RPET a una temperatura de conformado más elevada, experimenta un mayor desorden molecular, generando una fracción de masa cristalina amorfa en el polímero que aumenta el volumen libre de la fibra y una tasa de expansión fija. Esto resulta en una menor densidad a temperaturas más altas, con un consecuente incremento en el volumen.

Se determinó que la humedad relativa es dependiente de la temperatura, ya que al incrementar este valor por encima de los 280°C, se observa una mayor evaporación del producto orgánico, generando una degradación mayor del polímero y una reducción en su humedad relativa. Las fibras RPET son higroscópicas, lo que significa que tienen una alta sensibilidad a la temperatura.

Se logra concluir que el potencial de hidrógeno tiene una dependencia significativa con la interacción de la temperatura y la condición. Esto se debe a que, al experimentar un aumento en la temperatura, se produce una mayor degradación del polímero, generando un medio más ácido. Sin embargo, esta degradación puede ser controlada mediante la condición con chorro de aire, que reduce el tiempo de degradación del polímero.

Se logra concluir que el gramaje, al ser un parámetro esencial para el tejido de las fibras, está interrelacionado con la temperatura y las condiciones. La dependencia se basa en que, a una temperatura más elevada, se pueden generar fibras más amorfas en su estructura. A su vez, al generar estas fibras con la condición adecuada, podemos variar la finura de las mismas, teniendo áreas diferentes entre condiciones.

Se concluye que los parámetros de mayor relevancia se encuentran entre las temperaturas de conformado de 280°C a 300°C.

Tomando un error porcentual máximo del 5%, se concluyó, mediante el análisis comparativo, que las propiedades más cercanas a una fibra de poliéster virgen son el potencial de hidrógeno, la densidad aparente, el gramaje y el porcentaje de finura.

La investigación ha determinado que la temperatura óptima de conformado para la obtención de fibras RPET con propiedades similares a la fibra poliéster de referencia es de 300°C con chorro de aire(CC-300).

Al analizar el potencial de hidrógeno, se observa que la fibra CC-300, con un pH de 7,2375, cumple con los valores neutros ideales para aplicaciones textiles. Este factor influye positivamente en el color, suavidad y resistencia de la fibra, destacándose aún más al compararlo con la fibra poliéster, donde la diferencia es mínima, solo un 0,808%.

La densidad aparente más baja en la fibra CC-300 genera un mayor volumen debido a la delgadez de las fibras, y el análisis comparativo confirma su similitud con una fibra de poliéster virgen, presentando un pequeño error porcentual del 0,4148%.

La humedad relativa, como parámetro crítico para evaluar el rendimiento de absorción y disipación de humedad, demuestra una similitud entre la fibra CC-300°C y la fibra poliéster, imitando así un comportamiento textil que responde de manera eficaz a las condiciones en las que el cuerpo humano expulsa agua y secreciones al exterior.

El porcentaje de finura, indicador de la cantidad de fibras finas en la fibra CC-300°C, similar al de la fibra de poliéster, sugiere una facilidad para realizar el hilado, permitiendo la confección de tejidos más suaves y aplicables en la producción textil.

Al tener un porcentaje de finura dentro del rango de una fibra poliéster, se pueden realizar hilados y posteriores tejidos de fibra para el área textil, sin embargo estas no pueden ser de contacto continuo con la piel dado que generaría irritaciones, porque el factor de confort de las fibras obtenidas es mayor al 60%.

Aunque se observa un aumento general en el factor de confort a 300 °C, las marcadas diferencias con el poliéster indican que las fibras RPET conformadas a estas temperaturas no serían recomendables para ropa en contacto continuo con la piel, sino más bien para prendas textiles utilitarias o rellenos.

Las fibras CC-280, CC-300, SC-260 y SC-280 presentan una curvatura media, lo cual las hace apropiadas para su uso en materiales de aislamiento térmico debido a su flexibilidad, capacidad para retener aire y capacidad de recuperación. Además, estas características benefician el aislamiento acústico.

Las fibras producida sin chorro de aire a 280°C (SC-280) presentan una menor finura(diámetros más gruesos), además de tener propiedades como el gramaje, coeficiente de variación y extremo

más largo, similares a la fibra poliéster. Estas propiedades las vuelven más prácticas para aplicaciones en materiales de construcción, como aislantes térmicos y acústicos, que requiere fibras más gruesas.

Es importante resaltar que, mediante el proceso de fieltro en húmedo, las fibras RPET elaboradas sin chorro de aire generan piezas destinadas al área de construcción. Este enfoque específico amplía las posibilidades de aplicación de las fibras, destacando su versatilidad para adaptarse a diferentes necesidades y mercados.

Se observa un aumento significativo en la finura a temperaturas más elevadas, alcanzando su punto máximo a 300°C donde la densidad aparente disminuye, indicando una mayor expansión de las fibras a temperaturas superiores.

La variación de temperatura influye en el pH, mostrando valores más cercanos al poliéster a 300°C. Esto sugiere una mayor compatibilidad química y potencial aplicación en mezclas de fibras textiles.

Se registra una uniformidad baja del CV en condiciones de SC, lo cual indica mayor resistencia y mayor regularidad o uniformidad del tejido en esta condición en cualquier temperatura.

La condición de chorro de aire no afecta al gramaje de la fibra, sin embargo la temperatura de 260°C sí afecta al gramaje incrementándolo.

La implementación de la condición con chorro de aire presenta un impacto notable al reducir el factor de confort, lo cual resulta ventajoso para la industria textil. Un bajo factor de confort indica que la fibra se vuelve más adecuada para su uso en prendas textiles. No se evidencian efectos relevantes de la temperatura en este aspecto específico.

Con la fibra SC-280, es posible conformar hileras cruzadas mediante el proceso de fieltro en húmedo. Este método se empleó con el objetivo de lograr parámetros similares en cuanto a los materiales de celda abierta. Al caracterizar este material, obtuvimos un NRC de 0,21, el cual podría mejorar con el aumento del espesor, afectando positivamente esta propiedad acústica.

Para el análisis de resistencia térmica, se observa que, con una comparación anterior de la fibra de poliéster, el resultado es similar al esperado de  $0,15 \frac{m^2 K}{W}$  para la fibra de poliéster y  $0,12 \frac{m^2 K}{W}$  para la fibra RPET, teniendo un 20% de error porcentual.

Se logró establecer el planteamiento del problema relacionado con la variación de temperatura en el proceso de hilado centrífugo fundido de fibras RPET. Los objetivos específicos fueron claramente definidos, proporcionando una base para la investigación.

Se logró responder a la formulación del problema donde se ve cuáles variables son afectadas por variación de la temperatura de conformado en sus diferentes condiciones.

El desarrollo del fundamento teórico proporcione una comprensión profunda de los principios involucrados en el hilado centrífugo fundido y su relación con las propiedades de las fibras RPET. Esta base teórica respalda la investigación de manera integral.

El método de investigación seleccionado fue el diseño experimental puro. La combinación de análisis comparativos y ensayos específicos ha proporcionado una visión completa de las propiedades de las fibras RPET bajo diferentes condiciones, permitiendo una interpretación adecuada.

La operativización de las variables se ha llevado a cabo de manera efectiva, permitiendo la medición precisa de los elementos relevantes durante el proceso de hilado centrífugo fundido.

La evaluación y tratamiento de los datos se han llevado a cabo siguiendo las mejores prácticas estadísticas. La aplicación de herramientas como el análisis ANOVA y el análisis comparativo permitió una interpretación de las variaciones en las propiedades de las fibras RPET.

Los resultados obtenidos indican claramente cómo la variación de temperatura influye en diversas propiedades de las fibras RPET. La presentación detallada de estos resultados respalda la validez de las conclusiones extraídas, proporcionando una visión detallada de las alteraciones de las variables estudiadas.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar un nuevo estudio donde se reduzca las variables dependientes de estudio a solo la densidad aparente, la humedad relativa, potencial de hidrógeno y gramaje, con límites de 280°C a 300°C en intervalos más pequeños de 4 grados para el estudio de la temperatura de conformado.

Se sugiere ampliar la investigación abordando otros parámetros de estudio, como las propiedades mecánicas. Además, se recomienda profundizar en el proceso de filtrado en húmedo, explorando diferentes medios como agua, resina y polímeros expandibles.

Se recomienda extender la investigación al proceso de electrohilado para la fibra de RPET, considerando también la exploración de otras fibras termoplásticas, como el polietileno de alta y baja densidad.

Se recomienda realizar un estudio químico más profundo de las propiedades de la fibra, considerando la posible variación si la materia prima presenta pigmento.

Se recomienda llevar a cabo un análisis exhaustivo de los aspectos medioambientales relacionados con el proceso de fabricación de la fibra RPET, considerando la huella de carbono, el consumo de agua y otros impactos ambientales. Esto permitirá evaluar la sostenibilidad del proceso y proponer posibles mejoras o alternativas más ecológicas.

Las recomendaciones proporcionadas son fundamentales para la aplicación práctica de los resultados de la investigación en la producción de fibras sostenibles y de alta calidad.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS (CITAS)

- Alkadasi, M., & Asim, M. (2021). *Utilización de fibras de polietileno tereftalato reciclado en compuestos*. Journal of Reinforced Plastics and Composites.
- AM GROUP. (s.f). *Método de extrusión, su proceso y aplicación*. Recuperado el 11 de Octubre de 2022, de AM GROUP: <http://www.aristegui.info/método-de-extrusión-suproceso-y-aplicación>
- Bendita, J., Mamani, G., & Gumiel, P. (2022). Obtención de Fibra Plástica a Partir de Material Reciclado. (*Proyecto de Grado Técnico Superior*). Instituto Tecnológico Escuela Industrial Superior Pedro Domingo Murillo, La Paz, Bolivia.
- Callister, W. (2021). *Fundamentos de ciencia e ingeniería de materiales*.
- Carrera Gallissà, E. (2017). *Física textil Propiedades físicas para caracterizar la calidad de las fibras textiles*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Chavez Cruz, B. K. (2022). Caracterización y evaluación de la resistencia mecánica de la mezcla de hilos de fibra de alpaca con fibra proteica de leche. *Tesis de maestría*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa., Arequipa.
- E.Zander, N. (2017). Fibras compuestas de plásticos reciclados mediante hilatura centrífuga por fusión. *MDPI Materials*.
- Elivira, M. (2005). Presentacion del instrumento de medicion de finura OFDA 2000. *Sitio Argentino de Producción Animal*.
- Forero Villarraga, A. (2023). Obtencion de Fibras textiles a partir del reciclado del plastico(PET). *Proyecto de grado(Ingenieria Quimica)*. Fundacion Universidad de America, Bogota.
- García, A., & Tapia, J. (2007). Diseño de un Nuevo Proceso Para la Obtención de Fibras de Poliéster a Partir de Pet Reciclado. *Conciencia Tecnológica*(34), 60-61.
- Guerra, L. (2021). Diseño y construcción de un prototipo de procesadora de botellas plásticas PET recicladas para la obtención de fibra de poliéster. (*Proyecto de Investigacion y Desarrollo para Maestría*). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.

- Gumiel Rivera, P. A. (2021). *Estudio experimental de la morfología de la espuma de poliestireno expandible, como alternativa para la reducción de ruido*. (Vol. Primera). (P. Gumiel, Ed.) La Paz, Bolivia: Universal.
- HILOSVD. (2012). *Obtencion de fibras de poliester a partir de botellas de PET*. . Ciudad de Mexico.
- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 2076:2021 - Textiles — Man-made fibres — Generic names*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- ISO 527-1. (2012). *ISO 527-1:2012: Plastics — Determination of tensile properties*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- Juarez, M., Santiago, M., & Vera, J. (2011). Estudio de Factibilidad para la Manufactura de Empuñaduras de PET Reciclado. *e-Gnosis*, 1-12.
- Labcomercial. (20 de Noviembre de 2023). [www.labcomercial.com](http://www.labcomercial.com).
- López, C. (2016). Reciclado del plástico [PET\*] para la obtencion de fibra textil. (*Trabajo Final de Carrera*). Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N, Patagonia Austral Argentina.
- MACNCONICET. (AGOSTO de 2022). [WWW.MACNCONICET.GOB.AR](http://WWW.MACNCONICET.GOB.AR).
- Mamani Churata, F. G., & Limachi Lima, Y. M. (2022). El reciclaje de residuos plásticos (PET) con la participación del consumidor paceño. (*Proyecto de Grado Licenciatura*). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Marchant. (2017). *Feltmaking: A Comprehensive Guide to the Art of Needle Felting, Wet Felting, and More*. Nueva York, Estados unidos: Sterling Publishing Company.
- Maria Jose Gamez Naciones Unidas. (2 de Diciembre de 2022). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Mellado, P., McIlwee, H., & Goss, A. (2012). A simple model for nanofiber formation by rotary jet-spinning. *A simple model for nanofiber formation by rotary jet-spinning*. Universidad Harvard.
- Mettler Toledo. (20 de Noviembre de 2023). [www.mt.com](http://www.mt.com).

- MIDEBIEN. (AGOSTO de 2023). *MIDEBIEN.COM*.
- OAKTON. (AGOSTO de 2023). *WWW.LOBOV.COM.AR/PHIMETROS-PHMETRO-DE-MESADA-OAKTON-MODELO-PH-700-CON-ELECTRODO-DE-PH-TODO-EN-UNO-DET--35419-03*.
- OFDA. (Noviembre de 2023). *www.ofda.com*. Recuperado el 2023, de *www.ofda.com*.
- OHAUS. (2023). *MX.OHAUS.COM*.
- Oxford University Press. (2006). *Mecánica de materiales compuestos de ingeniería*. Reino Unido: Oxford University Press.
- Palacios, L. A. (2012). Métodos físico-químicos de caracterización de las fibras de polilactida. *Tesis de doctorado*. Univesidad Politecnica de Caraluña., Cataluña.
- Parales Castro, M. E. (2012). Modificación Estructural del Polietiléntereftalato con Ácido Poliláctico. Síntesis de Polímeros Biodegradables. *Tesis para maestro en tecnología Avanzada*. Instituto Politécnico Nacional, Mexico Distrito federal, Mexico.
- Reinozo Salinas, N. (2018). Desarrollo de un composite de matriz polimérica con refuerzos de fibra de madera de pino. (*Proyecto de Grado Licenciatura*). UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, Loja, Ecuador.
- SARTORIUS. (AGOSTO de 2023). *https://www.directindustry.es/prod/*.
- Segura, A., & Laura, B. (6 de julio de 2015). *Fibras Sinteticas* . Obtenido de Fibras Sinteticas Y Especialistas: *http://fibrassinteticasbell.blogspot.com/*
- SOLTEC. (AGOSTO de 2023). *soltecinstrumentos.com.ar/*.
- Techxplore. (Junio de 2020). *techxplore.com/news/2020-06-bioactive-inks-wearable-textiles-conditions.html*.
- Test Equipment Depot. (Noviembre de 2023). *www.testequipmentdepot.com*.
- Tranche, M. A. (2012). Estudio de la viabilidad del uso de una mezcla fenol/agua en el ensayo de solubilidad diferencial del poliéster. *Tesis de Doctorado*. Universidad Politècnica de Catalunya., Catalunya.

Trotec. (23 de Noviembre de 2023). *es.trotec.com*.

Truper. (20 de Noviembre de 2023). *www.truper.com/*.

Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). *Protocolos para caracterización de no tejidos conformados por nanofibras*. Medellin, Colombia: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

WWF-BOLIVIA. (2021). *Diagnóstico sobre la producción, uso y disposición final del plásticos de un solo uso en Bolivia*. La Paz: Mohamed Abdulraheew.

Zea, B., & Gary, J. (2019). Reciclado de plástico PET. (*Bachiller en Ingeniería Industrial*). Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Peru.

Zealchon. (2018). *Zealchon*. Obtenido de *www.zealchontesting.com*: *es.made-in-china.com*

Zhang, X. &. (2014). Centrifugal Spinning: An Alternative Approach to Fabricate Nanofibers at High Speed and Low Cost. *Polymer Reviews*. *Polymer Reviews*, 677-701.

Zhang, X. (2014). *Fundamentals of Fiber Science*. Lancaster, U.S.A.: DEStech Publications, Inc.

## 8. ANEXOS

### 8.1. ANEXO 1 COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE RUIDO.

Muestra 1 sin aislante, datos recolectados en la experimentación Tabla 77

**Tabla 77 Muestras Sin aislante.**

N°	Tiempo (s)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000(Hz)	8000(Hz)
1	3,00	109,80	99,20	99,00	110,20	110,10	98,00
2	6,00	109,80	99,10	99,10	110,30	108,80	98,70
3	9,00	109,80	99,00	99,60	110,40	110,00	97,50
4	12,00	109,80	98,90	99,40	109,90	109,90	97,40
5	15,00	109,80	98,80	99,30	110,20	109,70	98,10
6	18,00	109,90	98,80	99,10	110,30	109,20	97,70
7	21,00	109,90	98,70	98,80	110,40	108,80	97,40
8	24,00	109,90	98,60	99,30	110,20	110,20	97,70
9	27,00	109,80	98,60	99,10	110,30	109,50	97,90
10	30,00	109,90	98,50	99,20	110,40	108,80	97,50
11	33,00	109,90	98,50	98,80	110,30	110,20	98,30
12	36,00	109,90	98,40	98,70	110,40	109,70	97,70
13	39,00	109,80	98,50	98,80	110,20	109,20	97,50
14	42,00	109,90	98,40	98,80	110,30	108,80	97,80
15	45,00	109,90	98,50	98,70	110,30	110,20	98,10
16	48,00	109,90	98,60	98,70	110,40	109,50	97,70
17	51,00	109,80	98,50	98,80	110,20	110,20	97,40
18	54,00	109,90	98,50	98,80	110,30	109,70	97,70
19	57,00	109,80	98,40	98,70	110,40	109,20	97,90
20	60,00	109,80	98,50	98,80	110,40	108,80	97,50
	NPS	109,85	98,65	98,98	110,29	109,53	97,78

Fuente: Elaboración propia.

Muestra 2 Con aislante de fibra RPET, datos recolectados en la experimentación Tabla 78.

**Tabla 78 Muestras con aislante de fibra RPET**

N°	Tiempo (s)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000(Hz)	8000(Hz)
1	3,00	83,83	84,87	86,07	94,03	78,67	67,17
2	6,00	83,83	84,83	86,10	93,97	78,17	66,00
3	9,00	83,80	84,87	86,10	93,87	78,10	66,10
4	12,00	83,80	84,80	86,13	93,93	78,00	66,83
5	15,00	83,83	84,80	86,07	93,93	78,00	67,10
6	18,00	83,83	84,83	85,93	94,00	78,40	66,90
7	21,00	83,83	84,80	85,90	94,07	78,20	66,93
8	24,00	83,80	84,80	85,90	94,07	76,80	67,10
9	27,00	83,83	84,77	85,83	94,00	77,30	67,43
10	30,00	83,87	84,67	85,90	93,90	77,53	66,50
11	33,00	83,87	84,67	85,93	94,00	78,10	65,77
12	36,00	83,83	84,67	85,93	93,90	78,73	47,70
13	39,00	83,80	84,67	85,90	94,03	78,67	66,27
14	42,00	83,83	84,67	85,93	94,03	78,53	66,27
15	45,00	83,83	84,67	85,90	93,90	78,60	66,20
16	48,00	83,87	84,67	85,93	94,00	78,37	67,07
17	51,00	83,83	84,70	85,87	93,93	78,23	67,17
18	54,00	83,87	84,70	85,87	93,97	77,60	67,10
19	57,00	83,87	84,67	85,90	93,90	77,03	67,10
20	60,00	83,90	84,67	85,90	94,00	78,00	67,37
	NPS	83,83	84,87	86,07	94,03	78,67	67,17

Fuente: Elaboración propia.

Hallamos el NPS para la fibra RPET (Tabla 79).

**Tabla 79 NPS fibra RPET filtrada en húmedo**

Hz	NPS FIBRA RPET FILTRADA EN HÚMEDO	SIN AISLANTE
250	83,84	109,85
500	84,74	98,65
1000	85,95	98,98
2000	93,97	110,29
4000	78,05	109,53
8000	65,80	97,78

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del coeficiente de transmisión sonido STC se emplea la siguiente Tabla 80.

**Tabla 80 Cálculo de la pérdida de transmisión de sonido STL y del coeficiente de transmisión de sonido STC.**

<b>CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN DE SONIDO STL Y DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE SONIDO STC.</b>	
<b>FRECUENCIA(Hz)</b>	<b>FIBRA RPET FIELTRO EN HÚMEDO</b>
<b>250</b>	<b>26,01</b>
<b>500</b>	<b>13,91</b>
<b>1000</b>	<b>13,03</b>
<b>2000</b>	<b>16,32</b>
<b>4000</b>	<b>31,47</b>
<b>8000</b>	<b>31,97</b>
<b>STC</b>	<b>22,12</b>

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del nivel de presión sonora se emplea la siguiente Tabla 81.

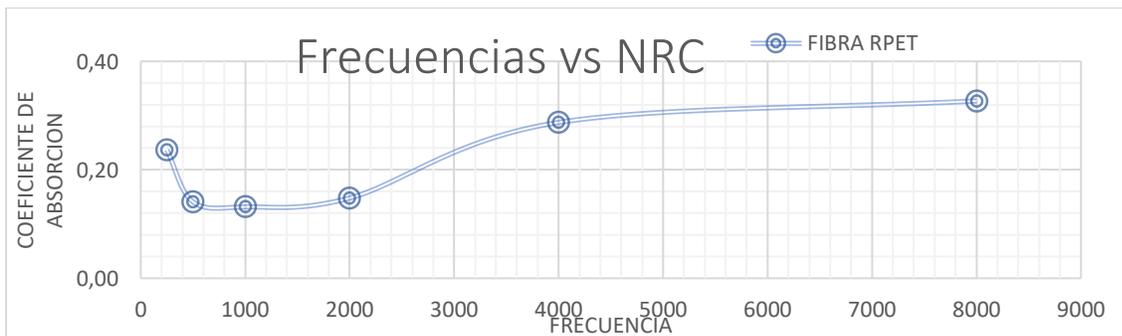
**Tabla 81 Calculo del SAC y del coeficiente de reducción de ruido NRC**

<b>CALCULO DEL SAC Y DEL COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE RUIDO NRC</b>	
<b>FRECUENCIA(Hz)</b>	<b>FIBRA RPET FIELTRO EN HÚMEDO</b>
<b>250</b>	<b>0,23</b>
<b>500</b>	<b>0,14</b>
<b>1000</b>	<b>0,13</b>
<b>2000</b>	<b>0,14</b>
<b>4000</b>	<b>0,28</b>
<b>8000</b>	<b>0,32</b>
<b>NRC</b>	<b>0,21</b>

Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia vs NRC se ilustra en la Imagen 106.

**Imagen 106 Frecuencia vs NRC**



Fuente: Elaboración propia.

## 8.2. ANEXO 2 RESISTENCIA TÉRMICA.

Las valores calculados para la resistencia térmica es:

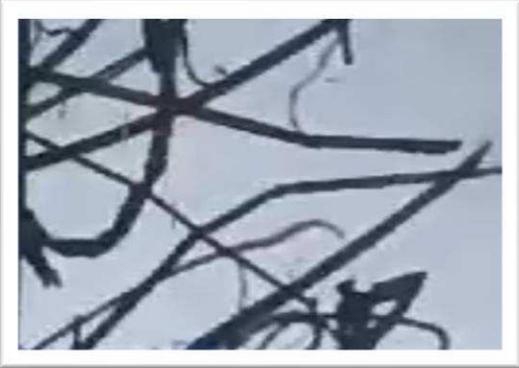
N°	Tin(K)	Tfi(K)	Area (m <sup>2</sup> )	Espesor(m)	K	R
1	291,60	291,50	0,0400	0,0111	0,3591	0,7753
2	312,00	297,00	0,0400	0,0111	53,8721	0,0052
3	319,00	301,00	0,0400	0,0111	64,6465	0,0043
4	324,00	317,00	0,0400	0,0111	25,1403	0,0111
5	291,70	291,10	0,0400	0,0159	1,5106	0,2629
6	315,00	296,00	0,0400	0,0159	47,8363	0,0083
7	322,10	300,10	0,0400	0,0159	55,3895	0,0072
8	333,20	300,80	0,0400	0,0159	81,5736	0,0049
9	291,40	290,30	0,0400	0,0135	3,2562	0,1037
10	322,20	302,50	0,0400	0,0135	58,3164	0,0058
11	327,70	303,40	0,0400	0,0135	71,9334	0,0047
12	324,00	303,70	0,0400	0,0135	60,0925	0,0056
13	291,60	291,50	0,0400	0,0111	0,3591	0,7753
14	312,00	297,00	0,0400	0,0111	53,8721	0,0052
15	319,00	301,00	0,0400	0,0111	64,6465	0,0043
16	324,00	317,00	0,0400	0,0111	25,1403	0,0111
17	292,70	292,30	0,0400	0,0159	1,0071	0,3944
18	334,50	304,50	0,0400	0,0159	75,5311	0,0053
19	337,40	305,30	0,0400	0,0159	80,8183	0,0049
20	337,00	310,20	0,0400	0,0159	67,4744	0,0059
	Resistencia térmica (R)					0,12

Fuente: Elaboración propia.

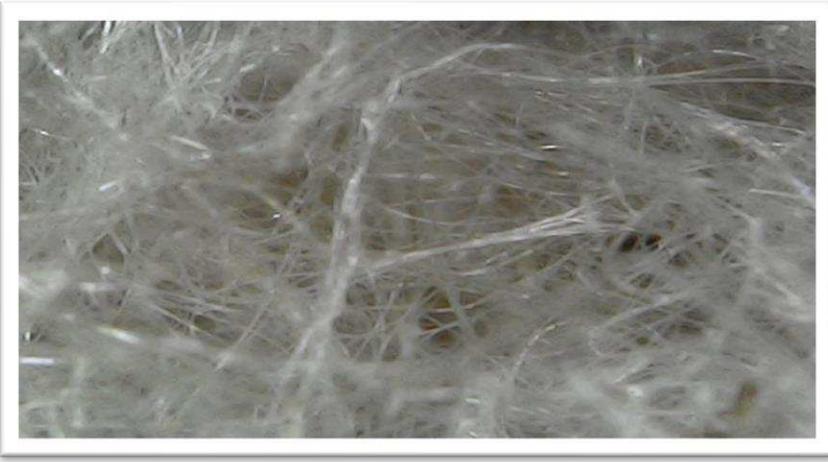
$$R = 0,12 \frac{m^2 K}{W}$$

### 8.3. ANEXO 3 FOTOMICROGRAFÍA DE FIBRAS.

**Tabla 82 Fotomicrografía fibra CC-260**

<b>Código</b>		<b>CC-260</b>	
<b>Descripción</b>		Fibra RPET con chorro de aire	
<b>Temperatura de conformado</b>		260°C	
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>			
<b>Imagen 107 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-260-1</b>		<b>Imagen 108 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-260-2</b>	
			
Fuente: Elaboración propia.		Fuente: Elaboración propia.	
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>			
<b>Imagen 109 Fotomicrografía 500x CC-260</b>			
			
Fuente: Elaboración propia.			

**Tabla 83 Fotomicrografía fibra CC-280**

Código		CC-280	
Descripción		Fibra RPET con chorro de aire	
Temperatura de conformado		280°C	
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>			
<b>Imagen 110 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-280-1</b>		<b>Imagen 111 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-280-2</b>	
			
Fuente: Elaboración propia.		Fuente: Elaboración propia.	
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>			
<b>Imagen 112 Fotomicrografía 500x CC-280</b>			
			
Fuente: Elaboración propia.			

**Tabla 84 Fotomicrografía fibra CC-300**

<b>Código</b>	<b>CC-300</b>
<b>Descripción</b>	Fibra RPET con chorro de aire
<b>Temperatura de conformado</b>	300°C
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>	
<p><b>Imagen 113 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-300-1</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>	<p><b>Imagen 114 Fotomicrografía OFDA 4000 CC-300-2</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>	
<p><b>Imagen 115 Fotomicrografía 500x CC-300</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>	

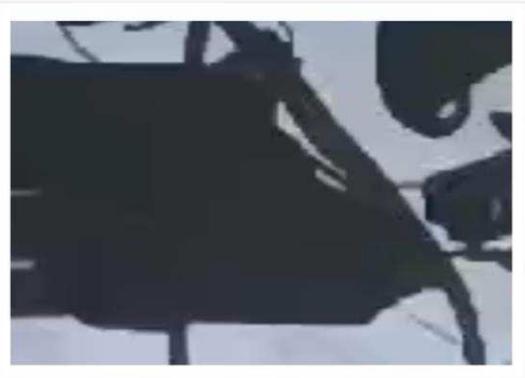
**Tabla 85 Fotomicrografía fibra SC-260**

<b>Código</b>	<b>SC-260</b>
<b>Descripción</b>	Fibra RPET sin chorro de aire
<b>Temperatura de conformado</b>	260°C
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>	
<p><b>Imagen 116 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-260-1</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaboración propia.</p>	<p><b>Imagen 117 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-260-2</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaboración propia.</p>
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>	
<p><b>Imagen 118 Fotomicrografía 500x SC-260</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Elaboración propia.</p>	

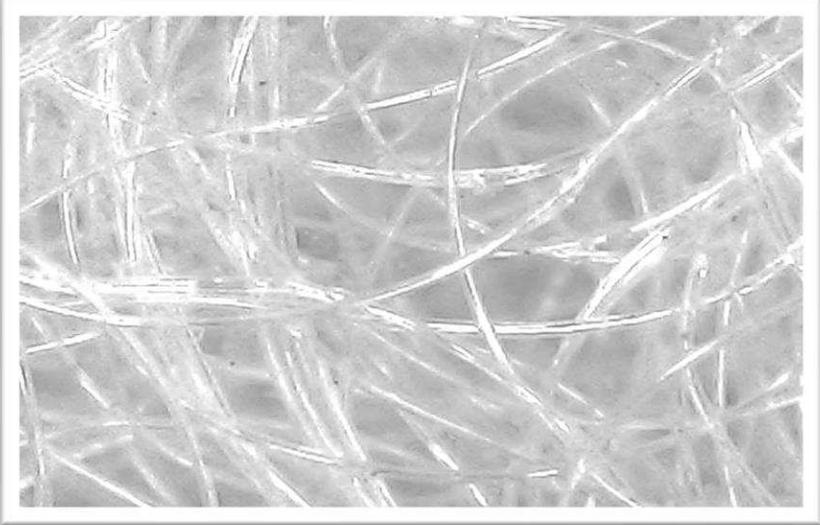
**Tabla 86 Fotomicrografía fibra SC-280**

<b>Código</b>	<b>SC-280</b>
<b>Descripción</b>	Fibra RPET sin chorro de aire
<b>Temperatura de conformado</b>	280°C
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>	
<p><b>Imagen 119 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-280-1</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>	<p><b>Imagen 120 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-280-2</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>	
<p><b>Imagen 121 Fotomicrografía 500x SC-280</b></p>  <p>Fuente: Elaboración propia.</p>	

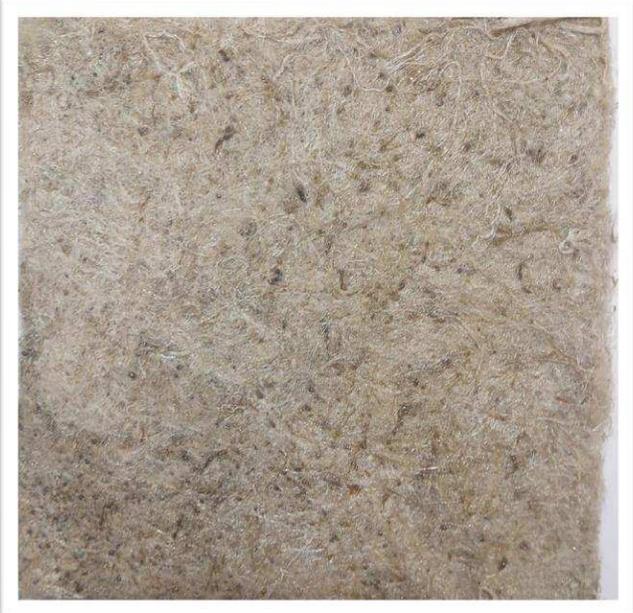
**Tabla 87 Fotomicrografía fibra SC-300**

<b>Código</b>	<b>SC-300</b>
<b>Descripción</b>	Fibra RPET sin chorro de aire
<b>Temperatura de conformado</b>	300°C
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>	
<p data-bbox="203 535 769 604"><b>Imagen 122 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-300-1</b></p>  <p data-bbox="305 1056 667 1092">Fuente: Elaboración propia.</p>	<p data-bbox="797 535 1364 604"><b>Imagen 123 Fotomicrografía OFDA 4000 SC-300-2</b></p>  <p data-bbox="899 1066 1261 1102">Fuente: Elaboración propia.</p>
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>	
<p data-bbox="492 1234 1078 1270" style="text-align: center;"><b>Imagen 124 Fotomicrografía 500x SC-300</b></p>  <p data-bbox="605 1801 964 1837" style="text-align: center;">Fuente: Elaboración propia.</p>	

**Tabla 88 Fotomicrografía fibra poliéster (PL)**

<b>Código</b>		<b>Poliéster (PL)</b>	
<b>Descripción</b>		Fibra poliéster	
<b>Fotomicrografía Microscopio OFDA 4000</b>			
<b>Imagen 125 Fotomicrografía OFDA 4000 Poliéster (PL)-1</b>		<b>Imagen 126 Fotomicrografía OFDA 4000 Poliéster (PL)-2</b>	
			
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>			
<b>Imagen 127 Fotomicrografía 500x Poliéster (PL)</b>			
			
Fuente: Elaboración propia.			

**Tabla 89 Fotomicrografía fibra con fieltro en húmedo SC-280**

Código		SC-280 Fieltro en húmedo	
Descripción		Fibra RPET 280 Sin chorro de aire F.H.	
<b>Fotomicrografía Microscopio 500x</b>			
<b>Imagen 128 Fotomicrografía fieltro en húmedo SC-280-1</b>		<b>Imagen 129 Fotomicrografía fieltro en húmedo SC-280-2</b>	
			
Fuente: Elaboración propia.		Fuente: Elaboración propia.	
<b>Registro fotográfico.</b>			
<b>Imagen 130 Fibra con fieltro en húmedo SC-280</b>			
			
Fuente: Elaboración propia.			

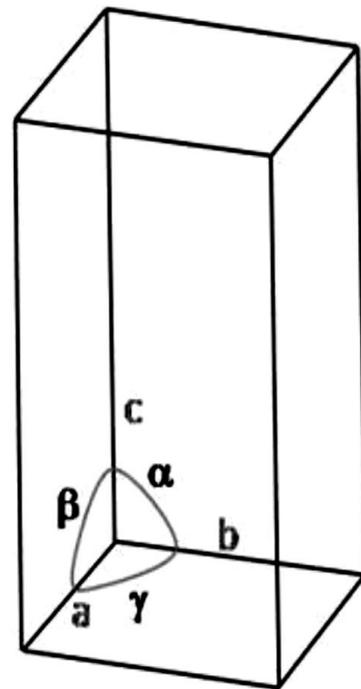
#### 8.4. ANEXO 4 AGRUPACIÓN DE LAS CADENAS EN UNA MALLA CRISTALINA TEREFTALATO DE POLIETILENO

Según (Tranche, 2012) las cadenas poliméricas tienden a alinearse de manera paralela y adoptan una disposición cristalina que refleja configuraciones estables. Este alineamiento conduce a un compacto agrupamiento de las cadenas, resultando en un espacio reducido entre ellas.

El poliéster cristaliza con una estructura triclinica, caracterizada por tener tres lados distintos ( $a \neq b \neq c$ ) y ángulos también distintos ( $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ) (Imagen 131). Las dimensiones y la inclinación de los ejes cristalográficos de la celda unitaria del poliéster, que representa la unidad repetitiva de su estructura cristalina.

**Imagen 131 Estructura triclinica.**

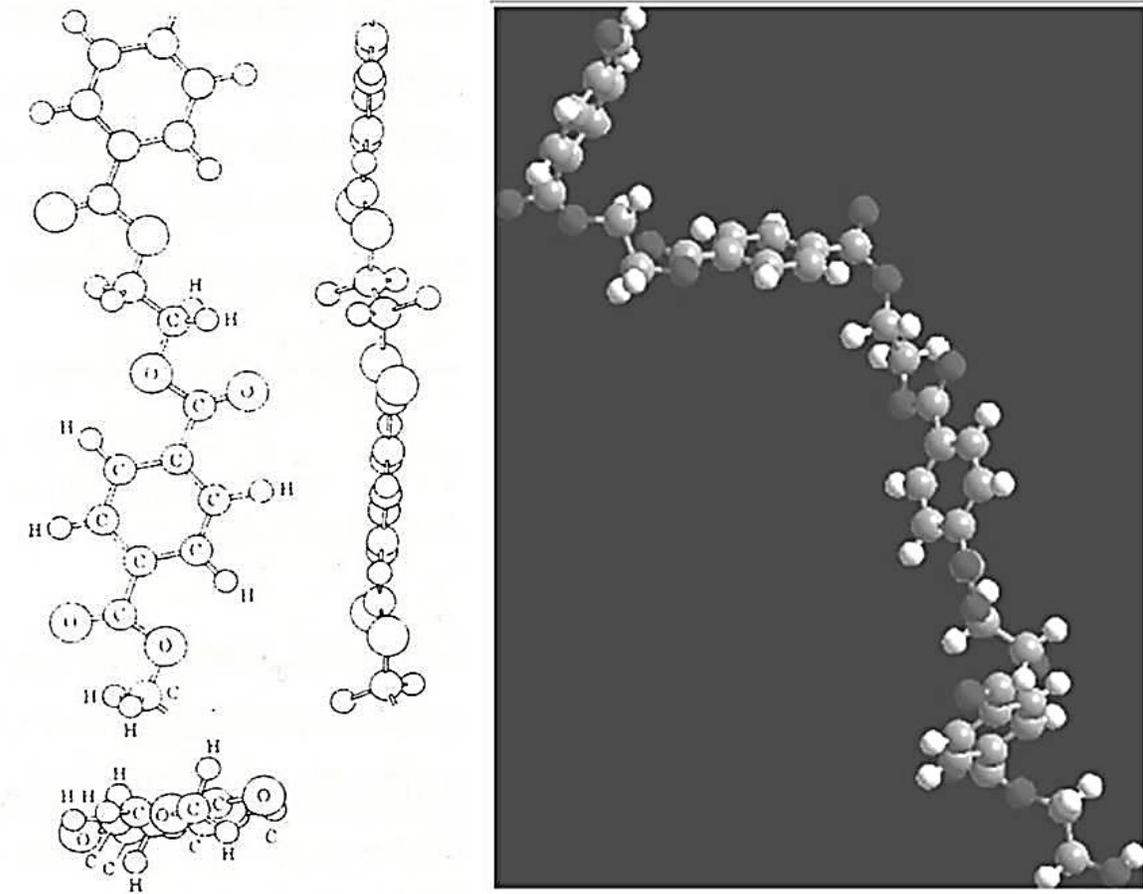
$$a = 4,56 \text{ \AA} \quad b = 5,94 \text{ \AA} \quad c = 10,75 \text{ \AA}$$
$$\alpha = 98,5^\circ \quad \beta = 118^\circ \quad \gamma = 112^\circ$$



Fuente: (Tranche, 2012)

Las cadenas moleculares (Imagen 132) están totalmente extendidas a lo largo del eje c, alcanzando una longitud de 10,75 Å. En caso de estar completamente extendidas, deberían tener una longitud de 10,9 Å.

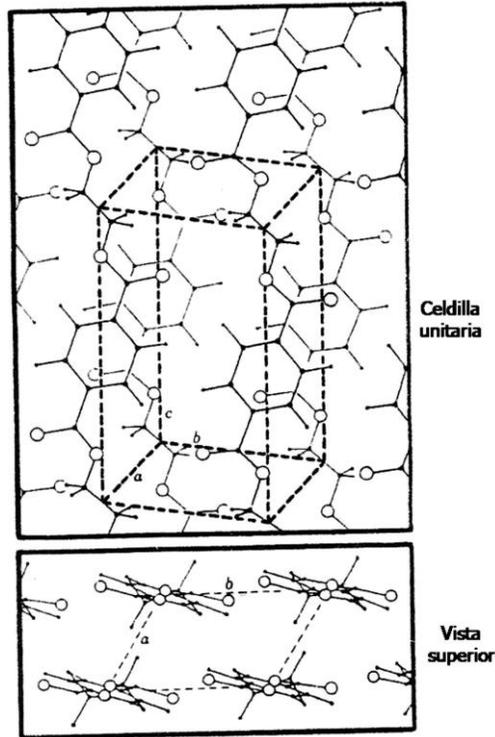
**Imagen 132 Cadena molecular del PET.**



Fuente: (Tranche, 2012)

Además, se encuentran ligeramente inclinadas con respecto al eje de la fibra. Los segmentos alifáticos (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) adoptan una configuración trans, mientras que los anillos aromáticos se disponen en planos perpendiculares al eje de la fibra (Imagen 133).

**Imagen 133 Estructura del PET cristalino.**



Fuente: (Tranche, 2012)

Las distancias entre átomos de moléculas vecinas se deben a interacciones de Van der Waals, lo que implica que las fuerzas de atracción entre moléculas adyacentes no son excesivamente fuertes y son comparables a las de un poliéster alifático similar, como el polietilenadipato. La variación en las propiedades del poliéster PET se atribuye a la rigidez del anillo aromático unido a los enlaces éster, confiriendo características distintivas a su estructura y comportamiento(Tranche, 2012).

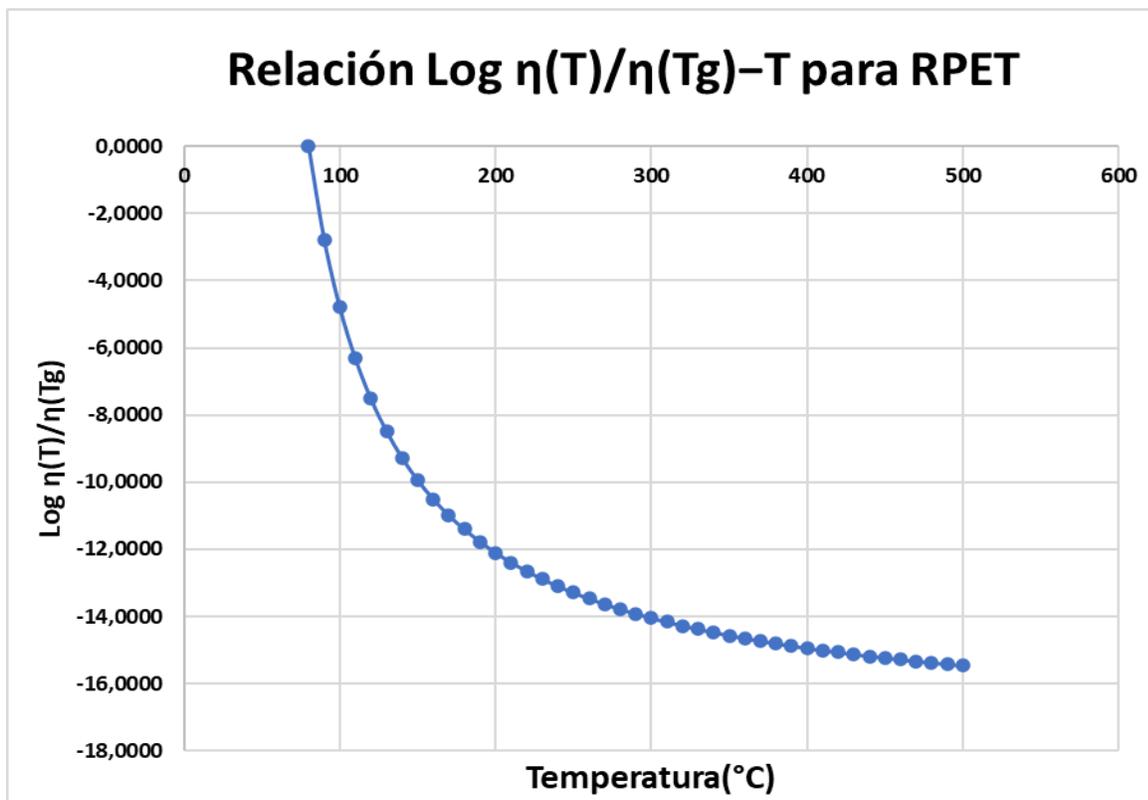
## 8.5. ANEXO 5 GRAFICA DE LA RELACIÓN LOG H(T)/H(TG)–T

Tabla 90 Relación  $\log \eta(T)/\eta(Tg)$ –T RPET

T(°C)	$\log[\eta(T)/\eta(Tg)]$	T(°C)	$\log[\eta(T)/\eta(Tg)]$	T(°C)	$\log[\eta(T)/\eta(Tg)]$	T(°C)	$\log[\eta(T)/\eta(Tg)]$
80	0,0000	190	-11,7712	300	-14,0426	410	-15,0078
90	-2,7796	200	-12,0973	310	-14,1614	420	-15,0688
100	-4,7934	210	-12,3877	320	-14,2720	430	-15,1267
110	-6,3196	220	-12,6480	330	-14,3754	440	-15,1818
120	-7,5162	230	-12,8825	340	-14,4722	450	-15,2343
130	-8,4795	240	-13,0950	350	-14,5629	460	-15,2843
140	-9,2718	250	-13,2884	360	-14,6482	470	-15,3321
150	-9,9347	260	-13,4652	370	-14,7285	480	-15,3778
160	-10,4977	270	-13,6274	380	-14,8043	490	-15,4215
170	-10,9818	280	-13,7767	390	-14,8759	500	-15,4634
180	-11,4024	290	-13,9147	400	-14,9436		

Fuente: Elaboración propia.

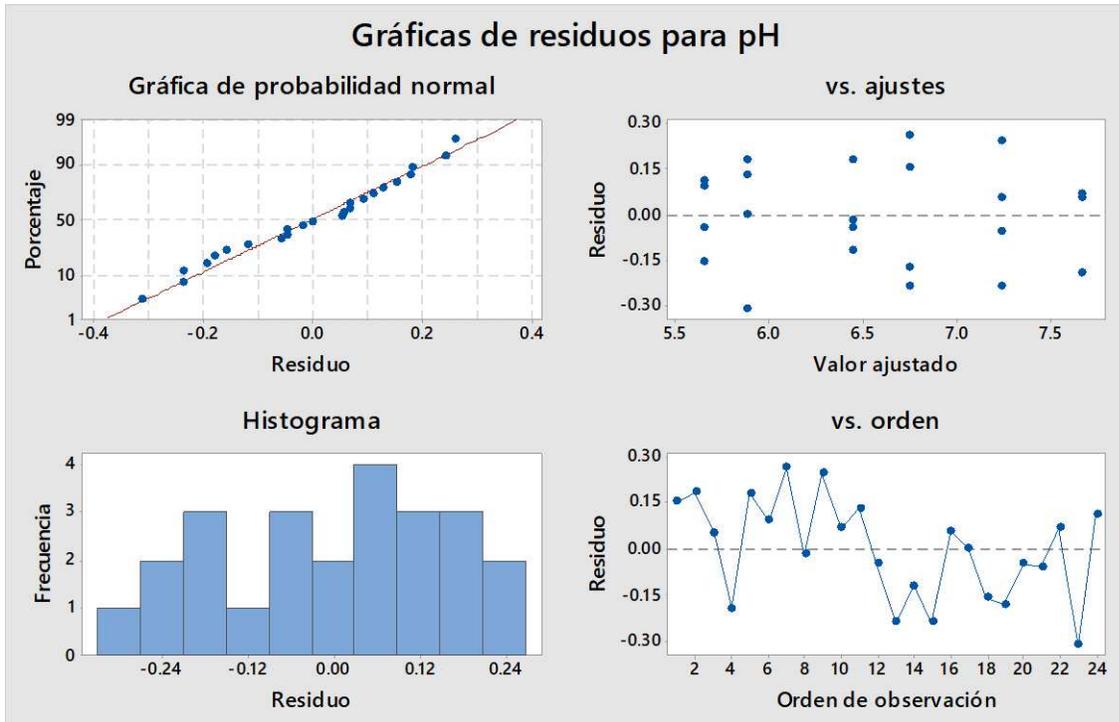
Imagen 134 Relación  $\log \eta(T)/\eta(Tg)$ –T RPET



Fuente: Elaboración propia.

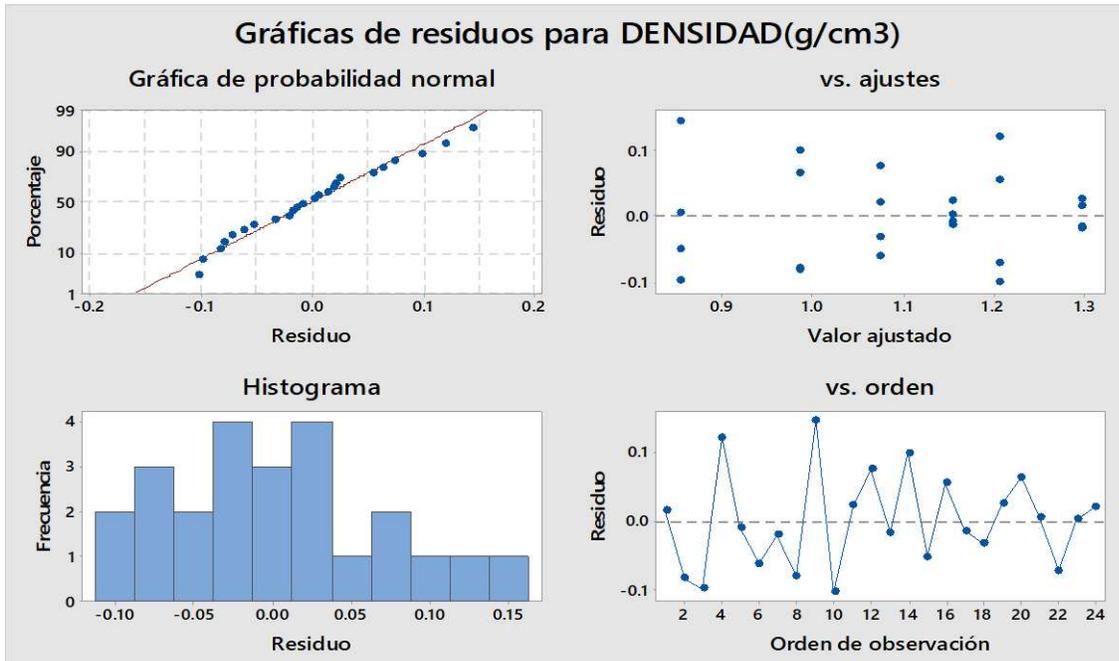
## 8.6. ANEXO 6 GRAFICAS DE RESIDUOS VARIABLE INDEPENDIENTE

### Imagen 135 Grafica de residuos para pH



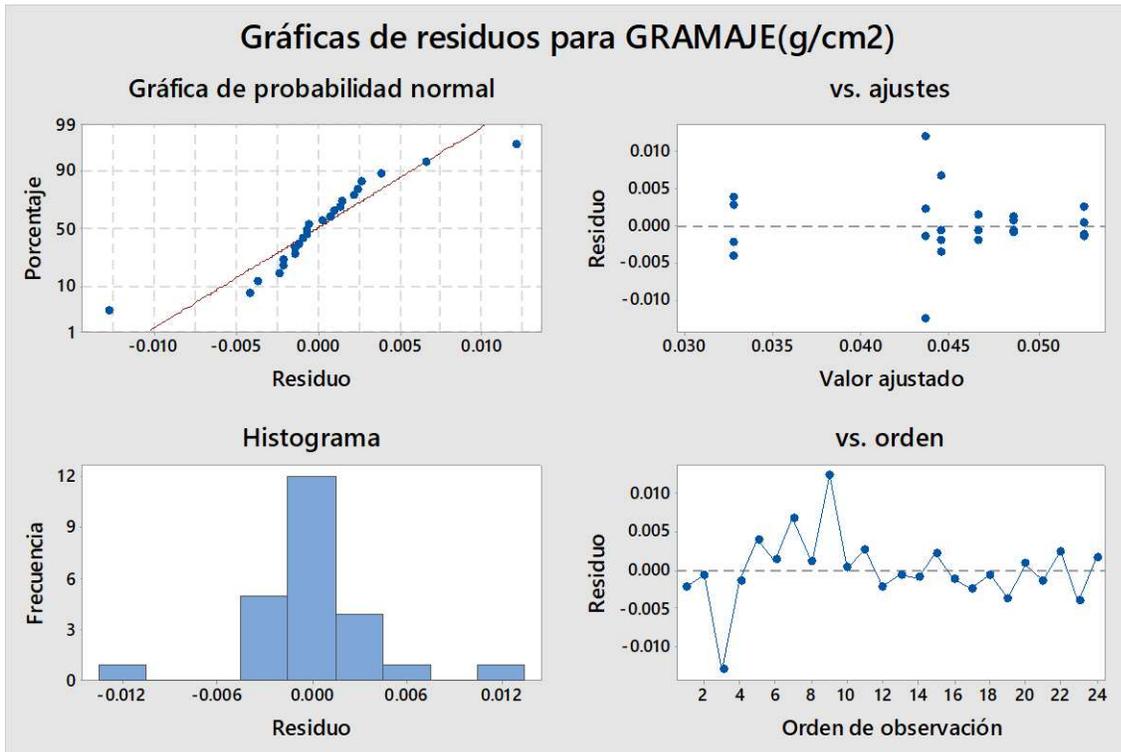
Fuente: Elaboración propia.

### Imagen 136 Grafica de residuos para densidad



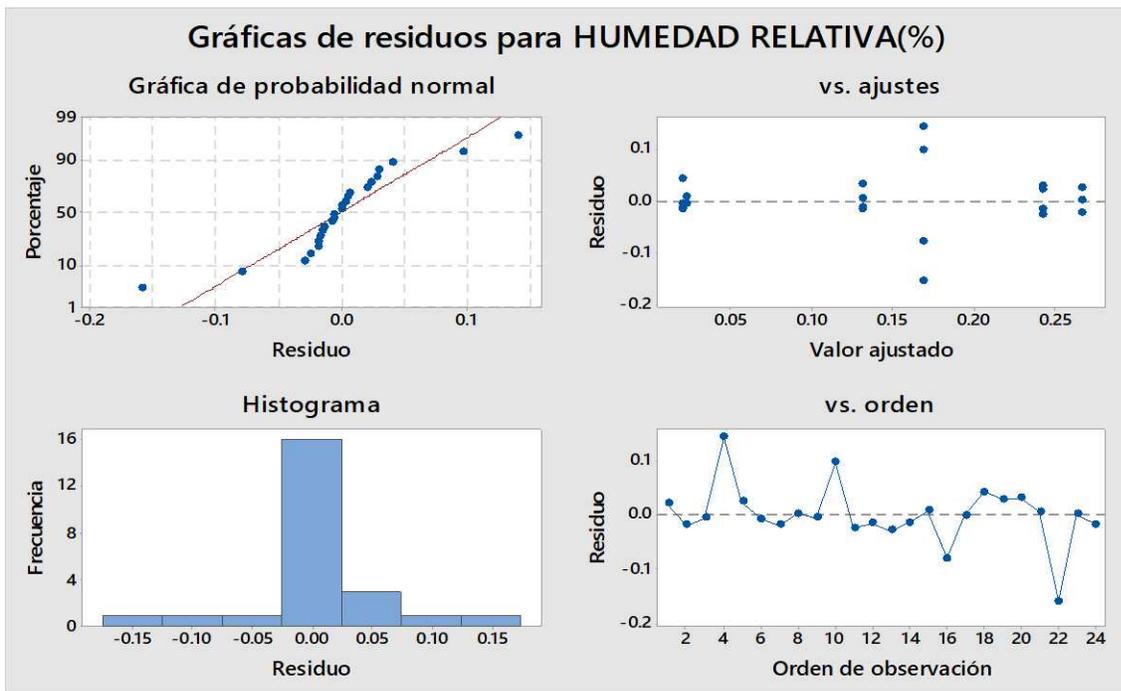
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 137 Grafica de residuos para gramaje



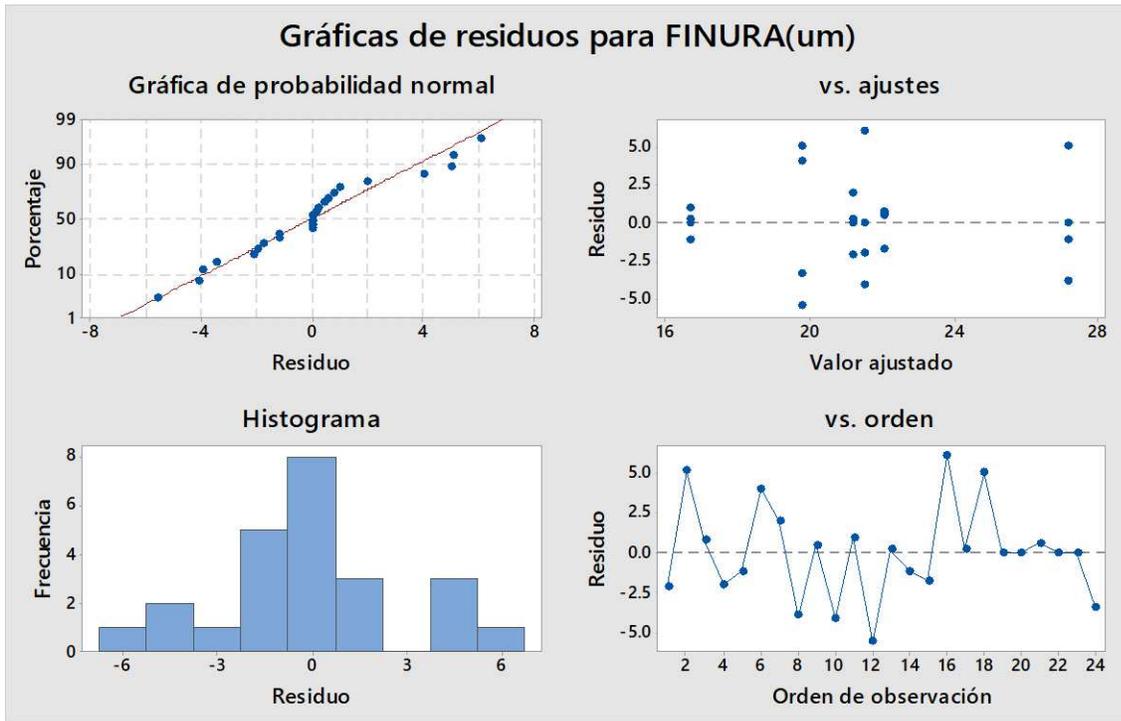
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 138 Grafica de residuos para Humedad Relativa



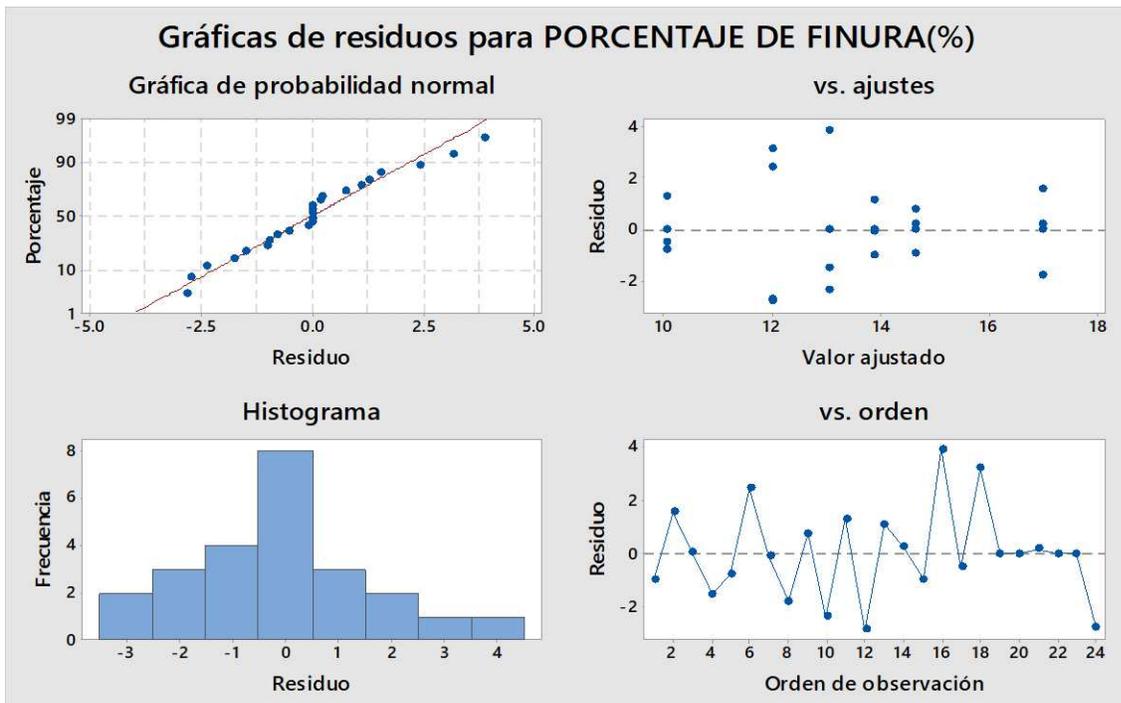
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 139 Grafica de residuos Finura.**



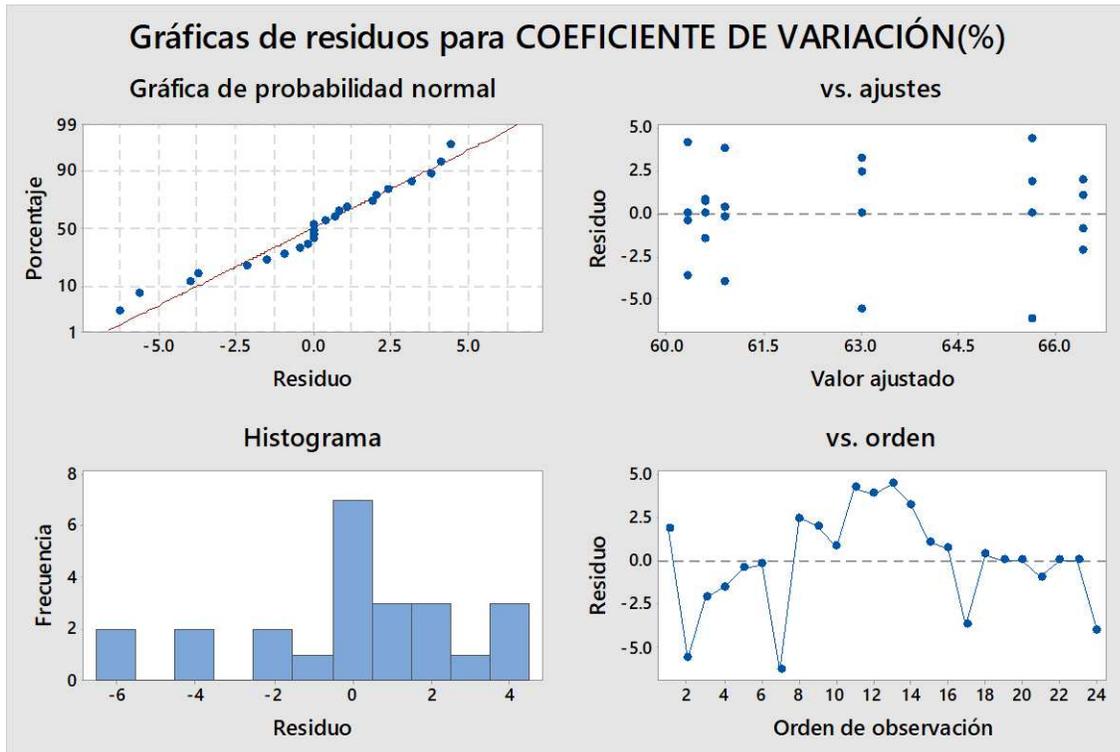
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 140 Grafica de residuos Porcentaje de Finura.**



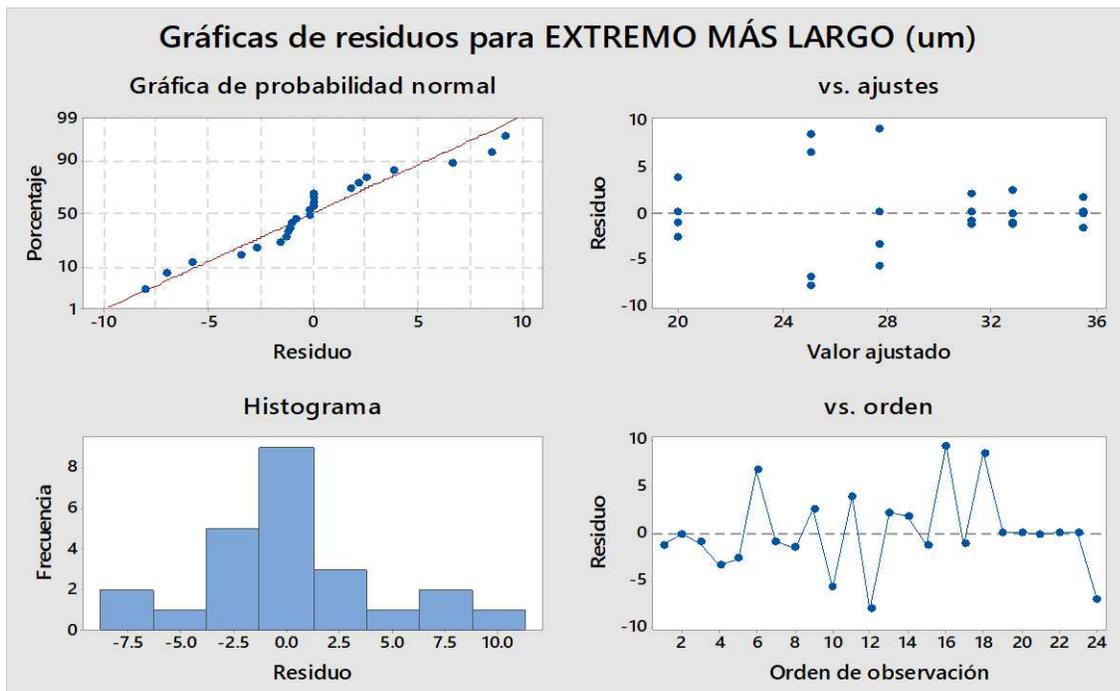
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 141 Grafica de residuos Coeficiente de variación



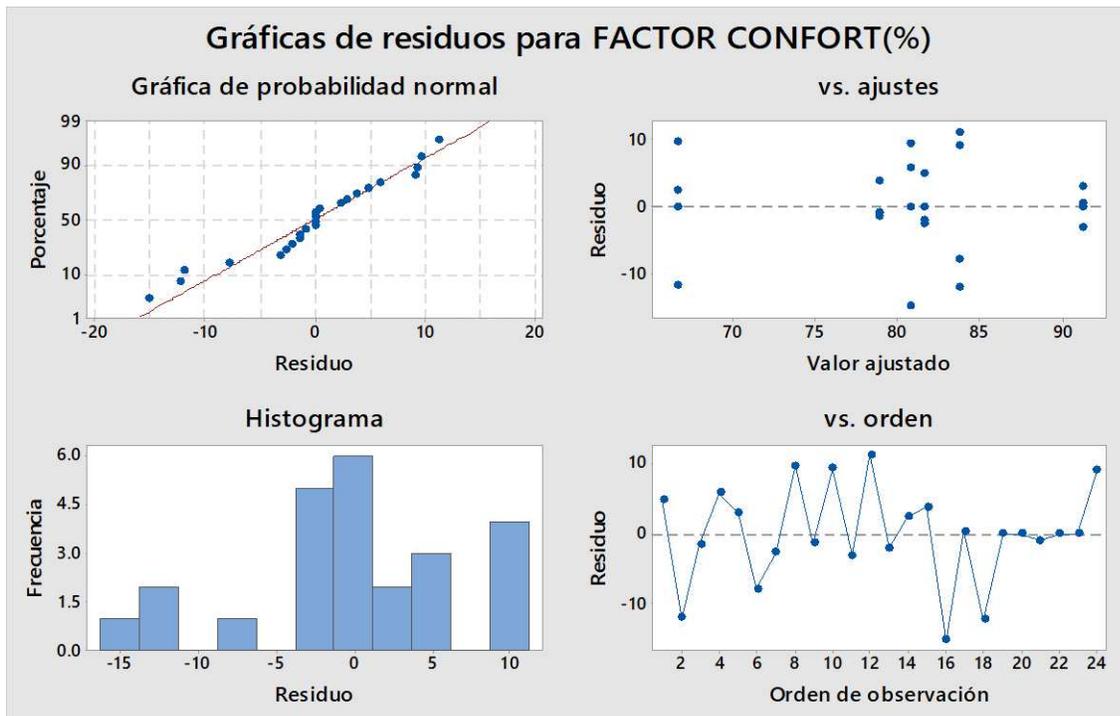
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 142 Grafica de residuos Extremo más largo.



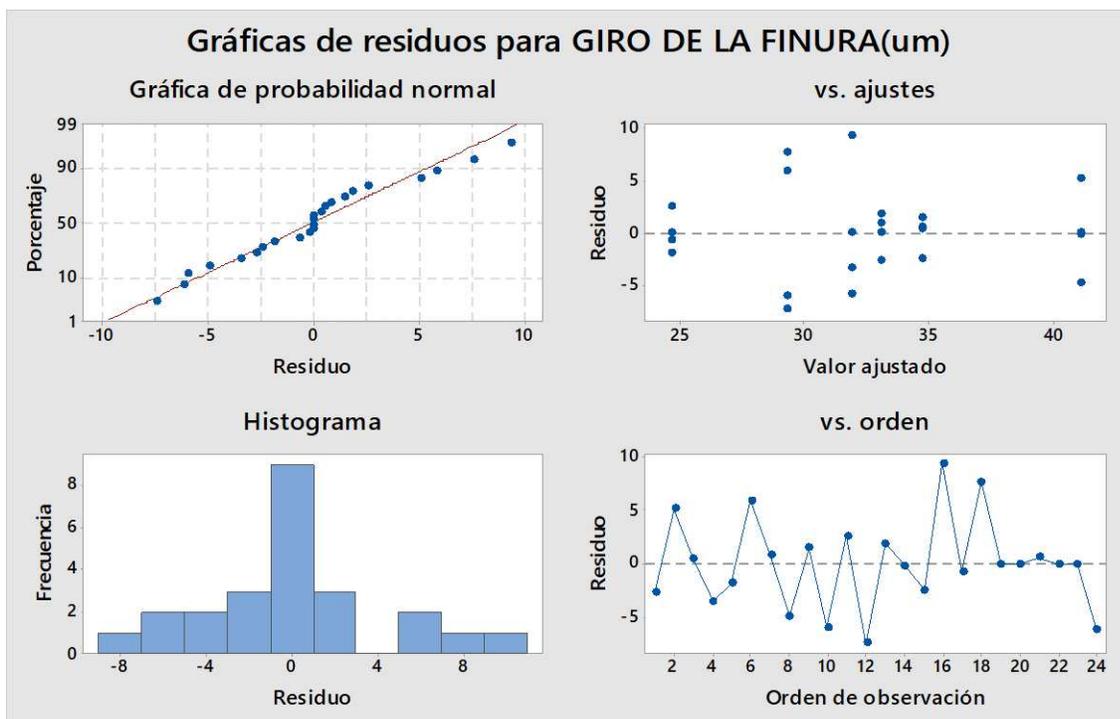
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 143 Grafica de residuos Factor Confort**



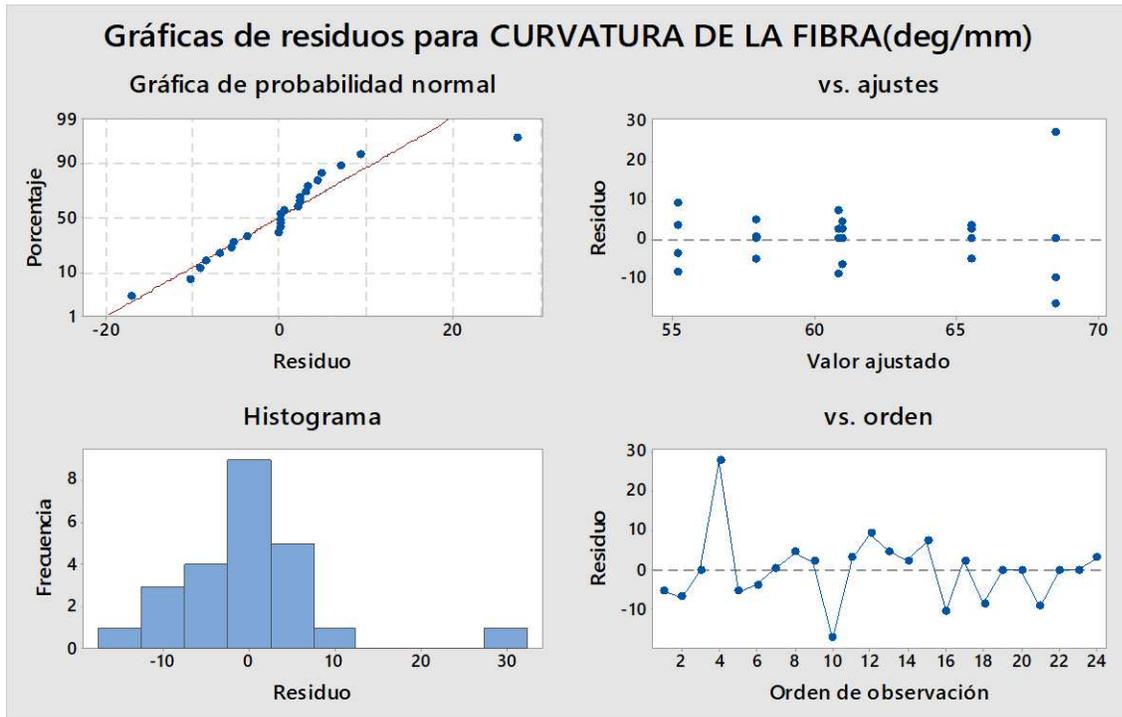
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 144 Grafica de residuos giro de la finura**



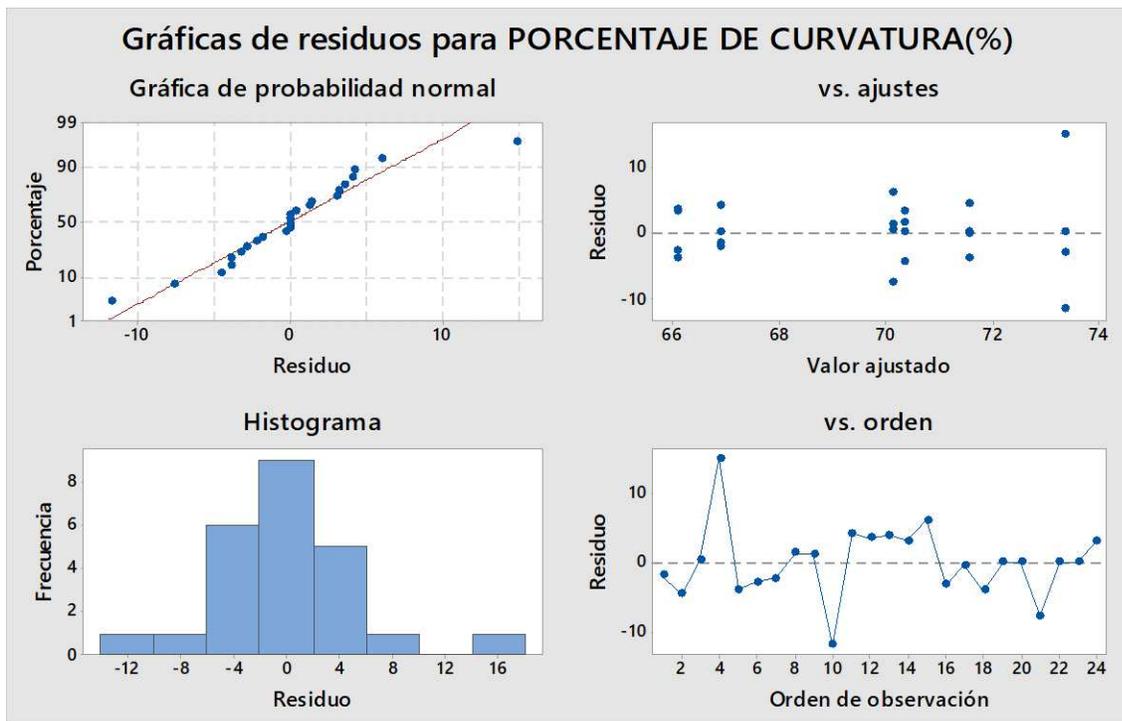
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 145 Grafica de residuos Curvatura de la Fibra.**



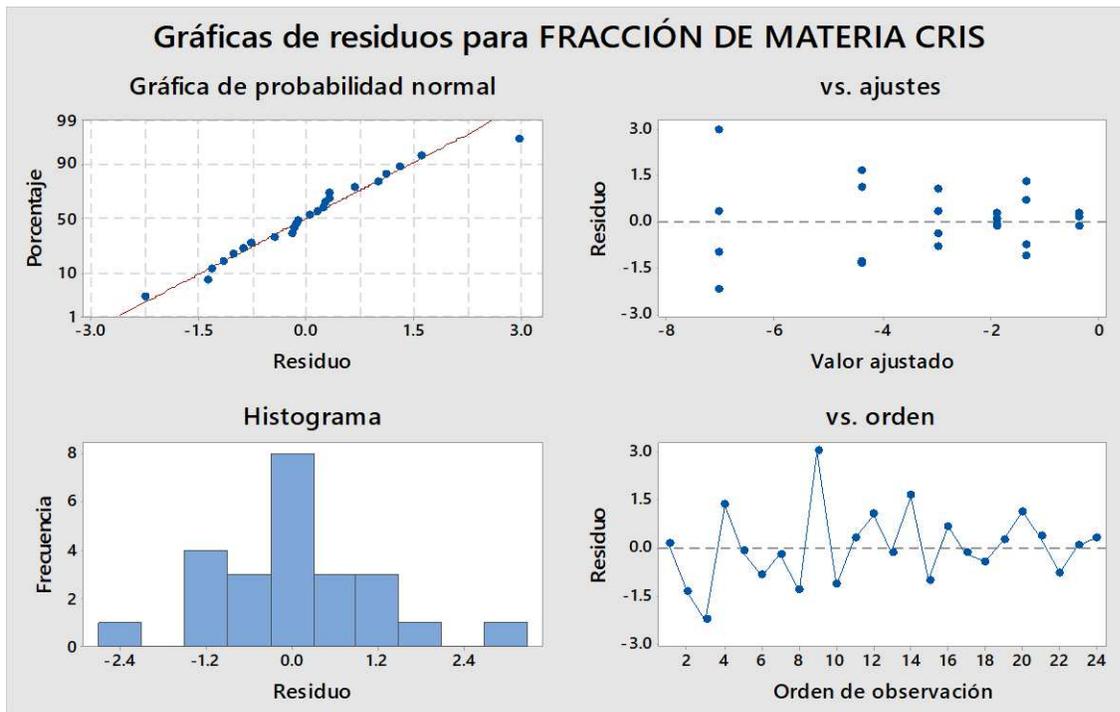
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 146 Grafica de residuos porcentaje de curvatura.**



Fuente: Elaboración propia.

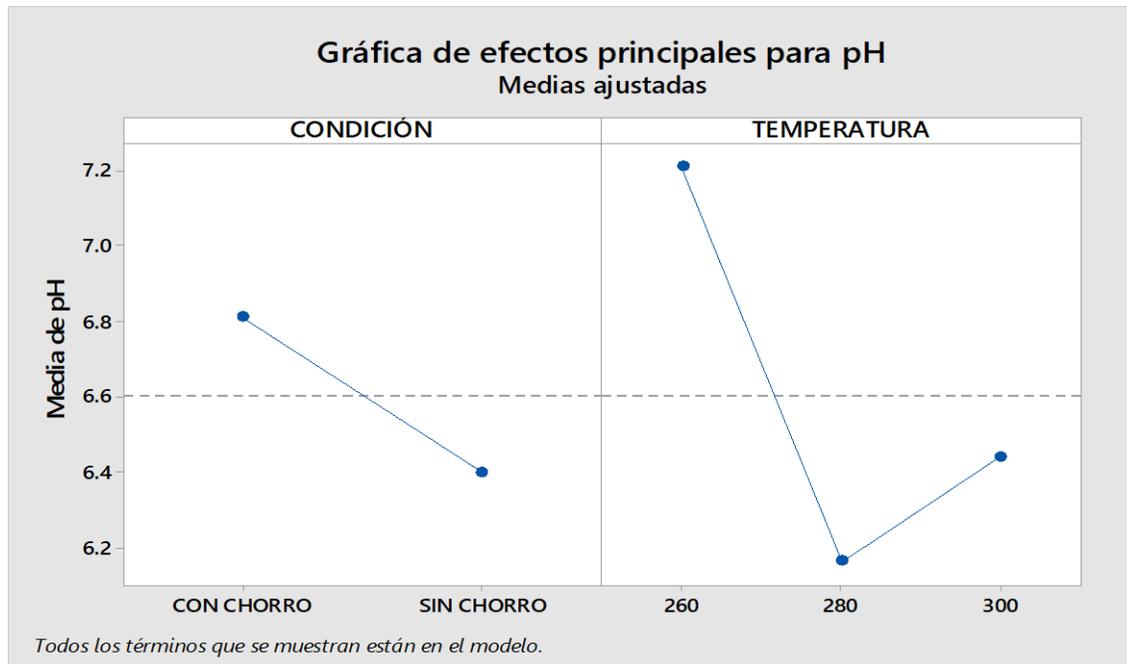
Imagen 147 Grafica de residuos fracción de materia cristalina.



Fuente: Elaboración propia.

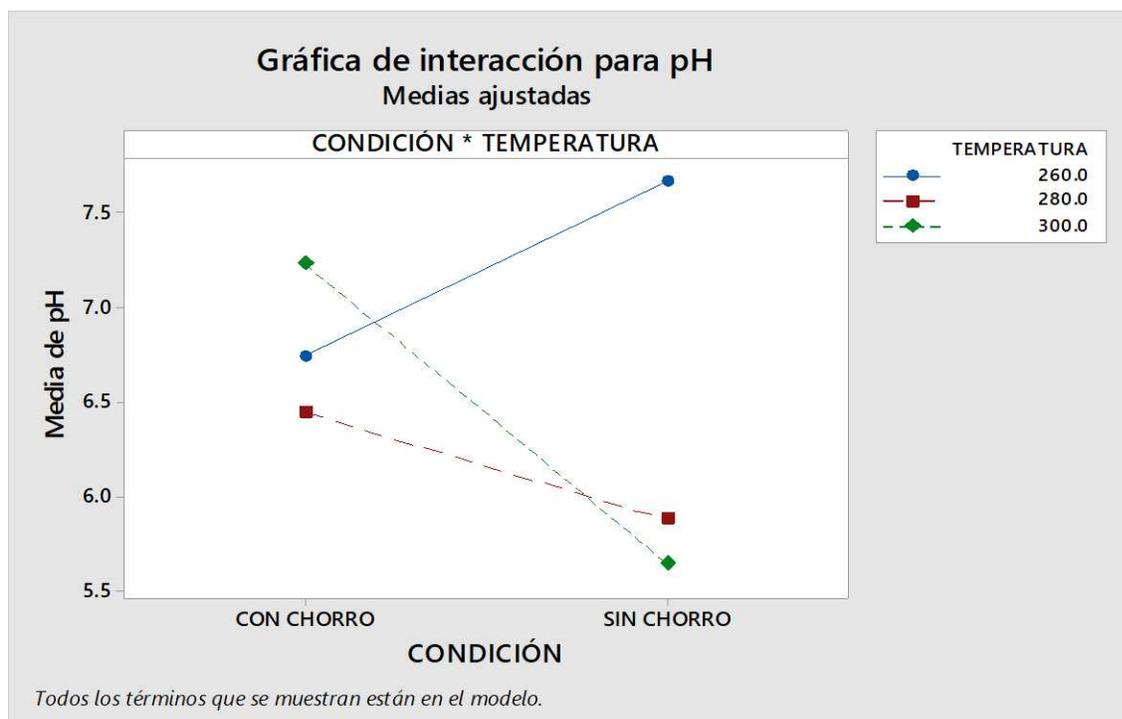
## 8.7. ANEXO 7 GRAFICAS DE INTERACCIÓN Y EFECTOS

Imagen 148 Grafica de efectos principales para pH.



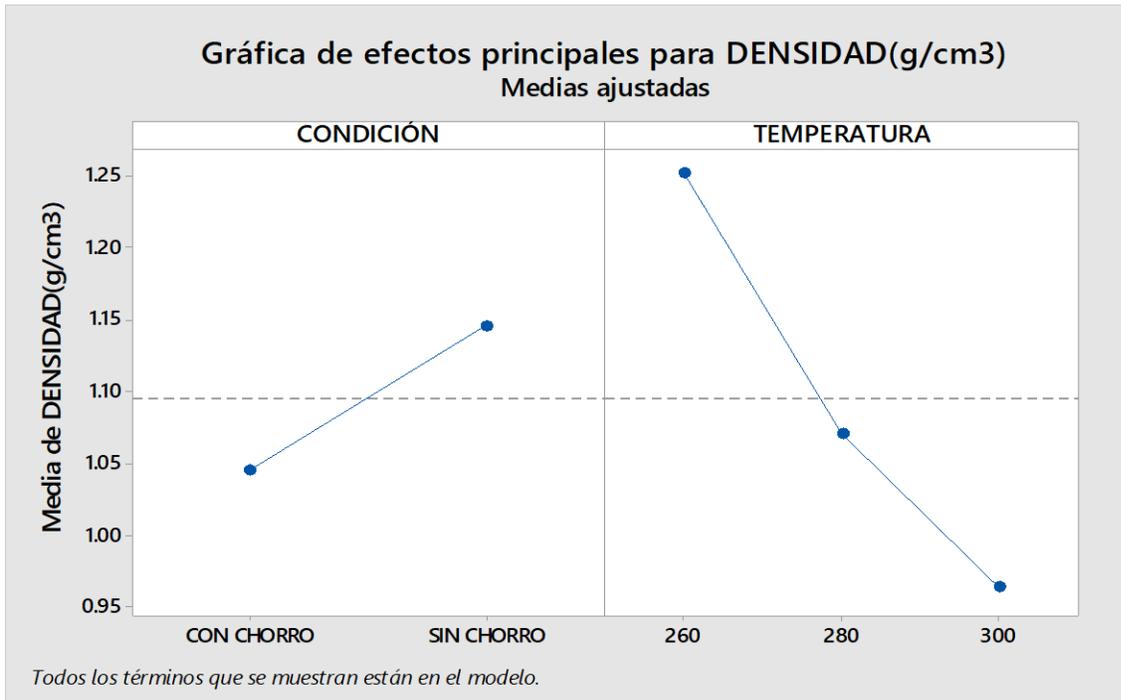
Fuente: Elaboración propia.

Imagen 149 Grafica de interacción para pH.



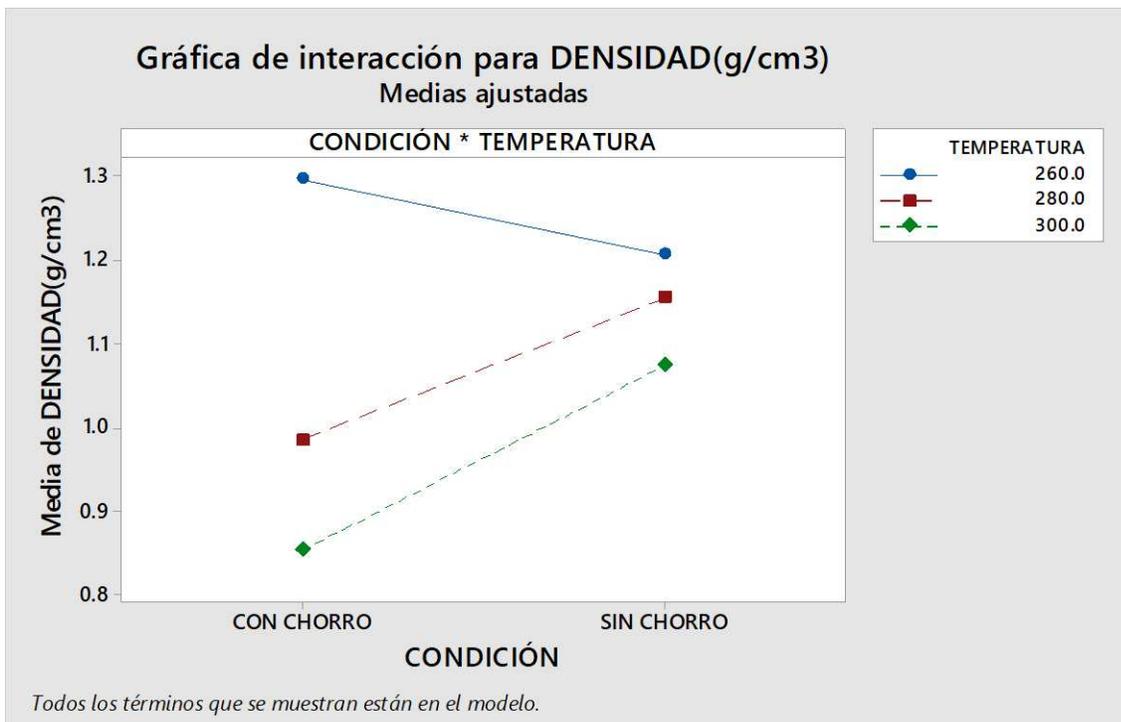
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 150 Grafica de efectos principales para densidad.**



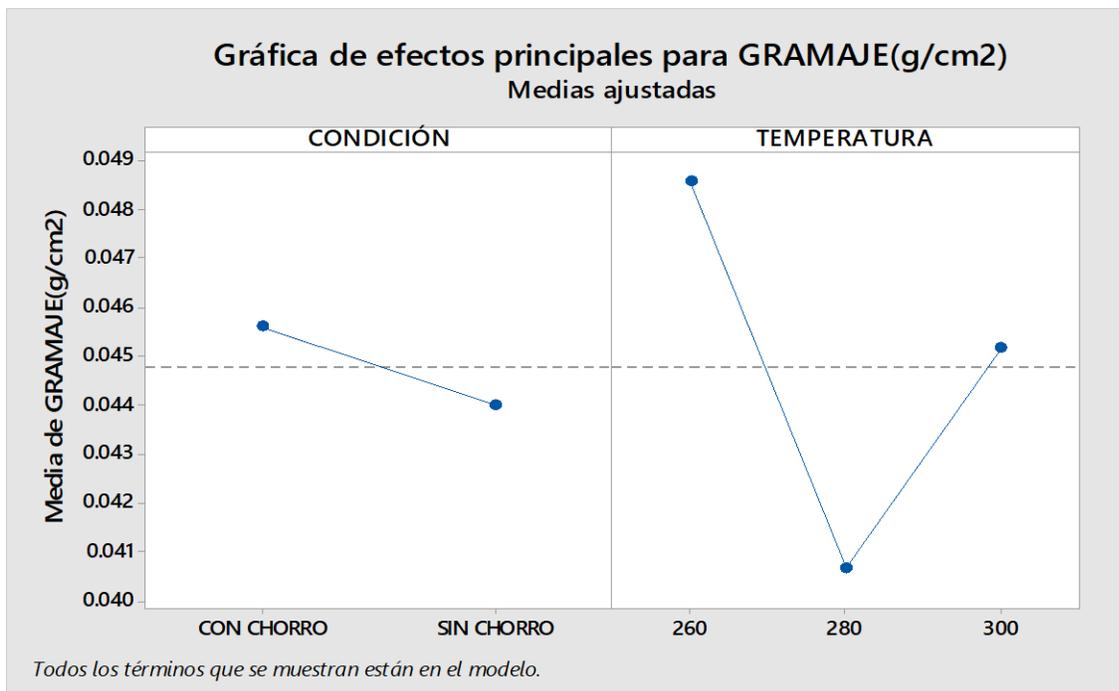
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 151 Grafica de interacción para densidad.**



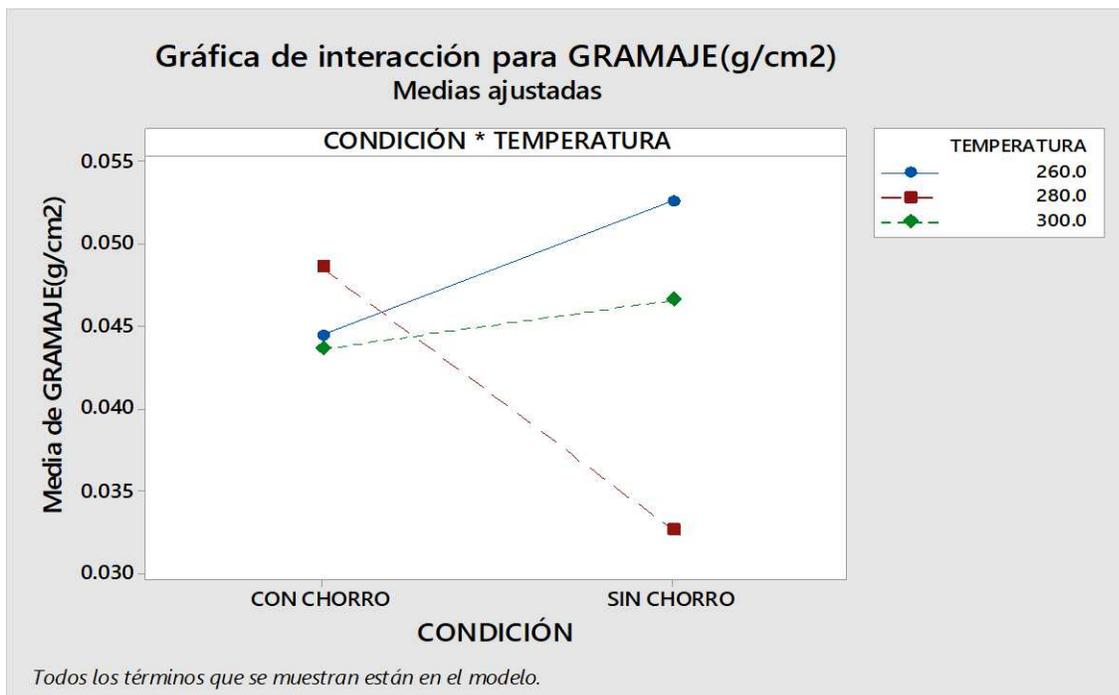
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 152 Grafica de efectos principales para gramaje.**



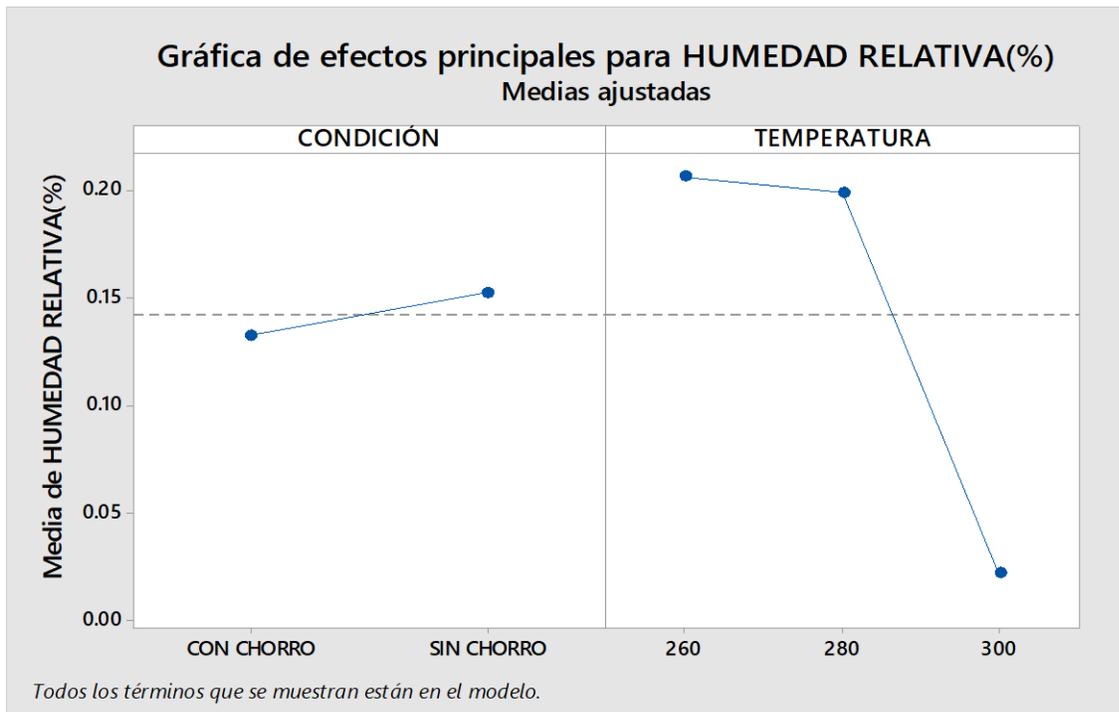
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 153 Grafica de interacción para gramaje.**



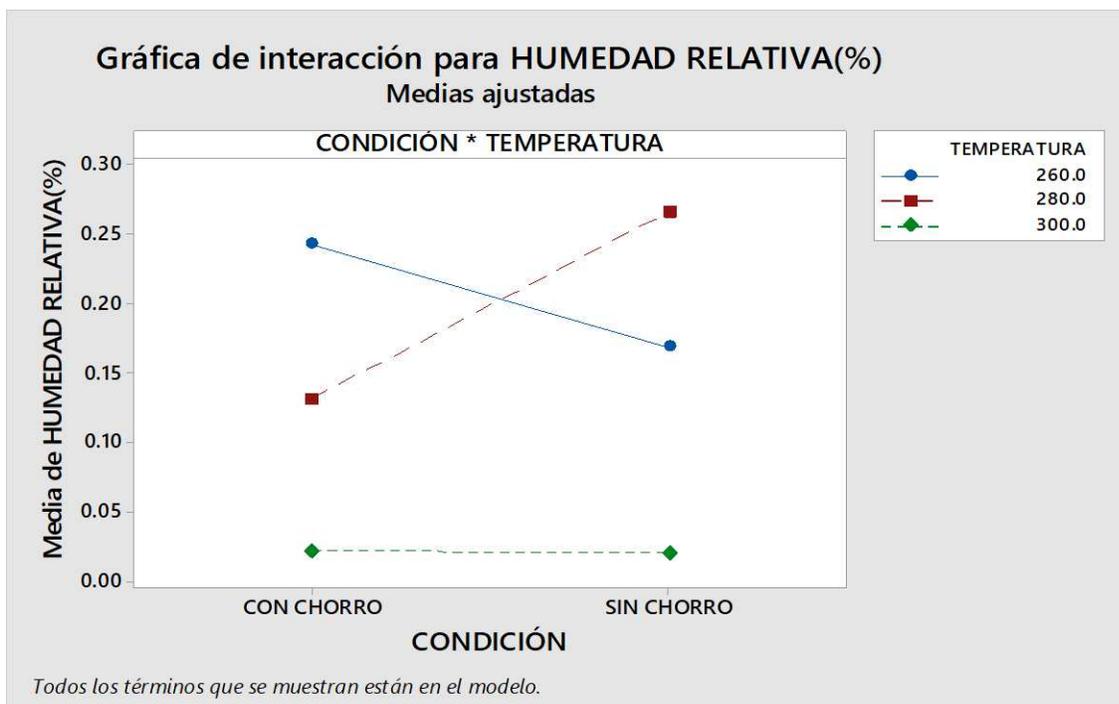
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 154 Grafica de efectos principales para humedad relativa.**



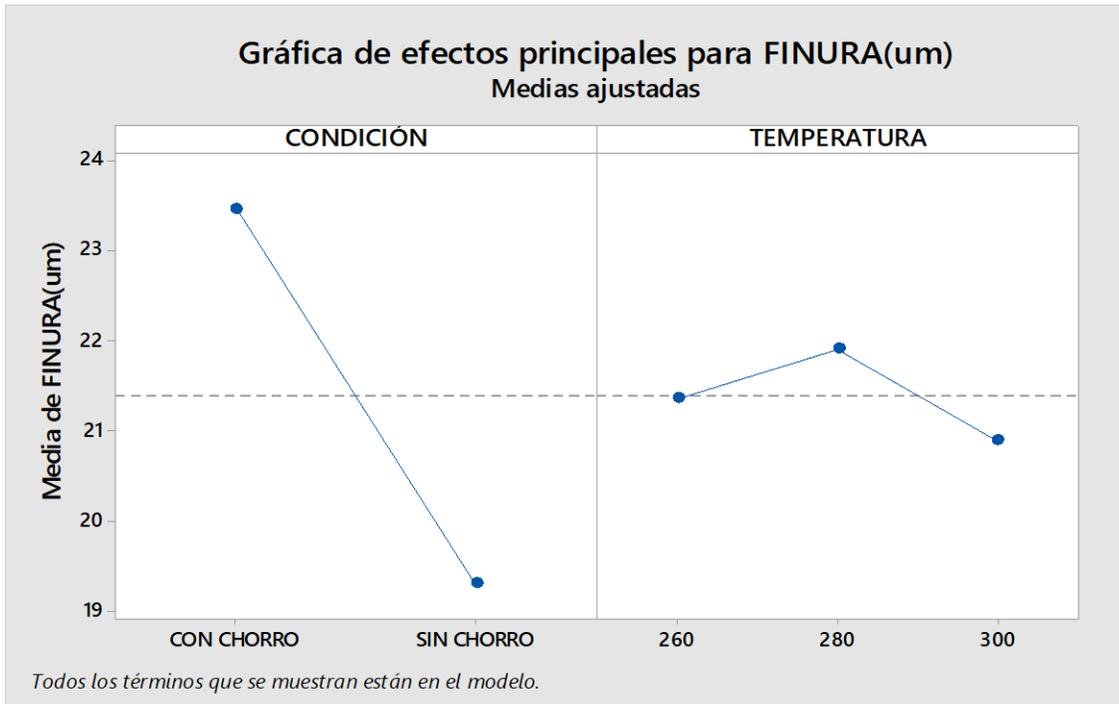
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 155 Grafica de interacción para humedad relativa.**



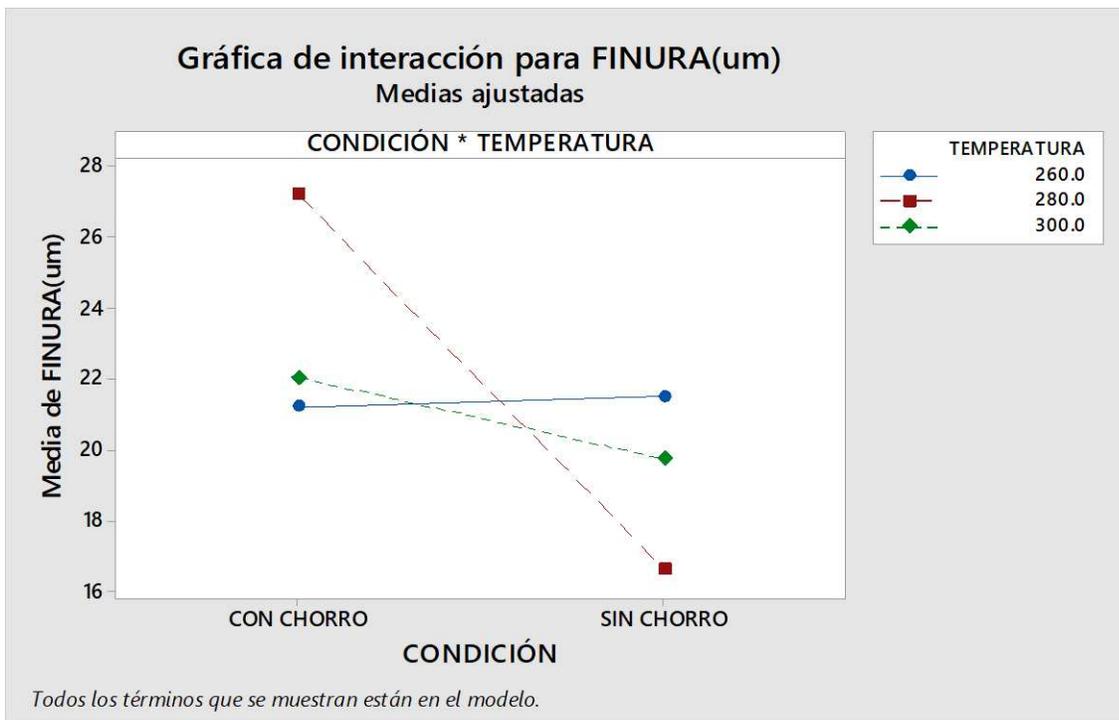
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 156 Grafica de efectos principales para finura.**



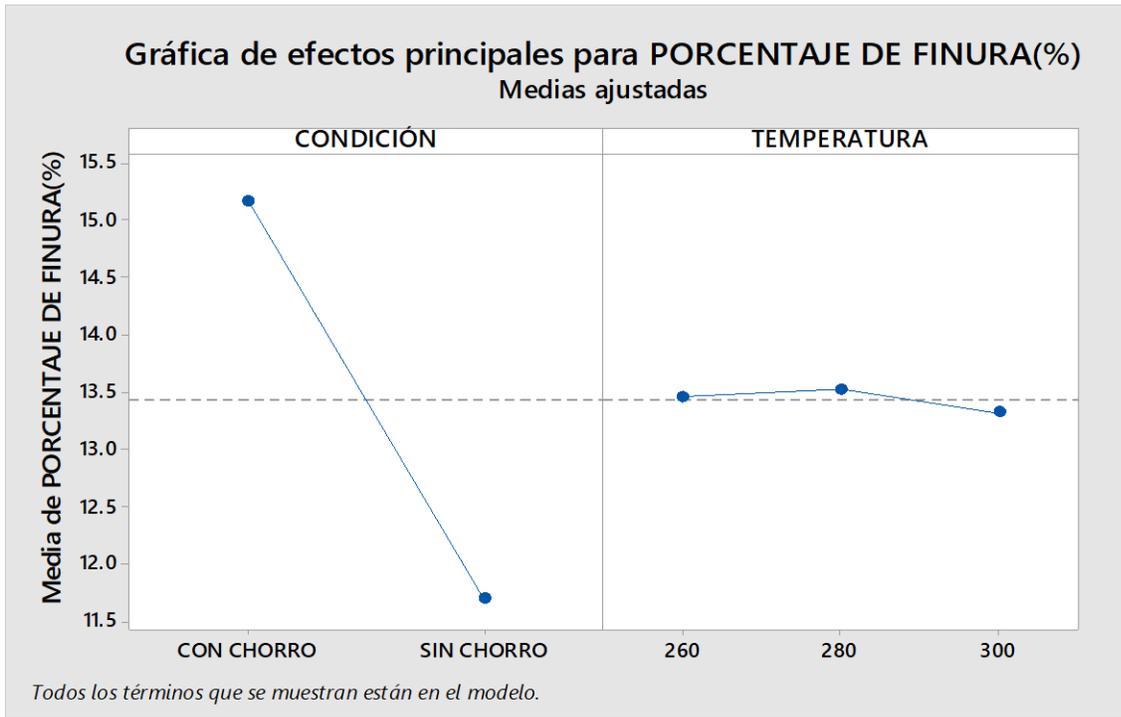
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 157 Grafica de interacción para finura.**



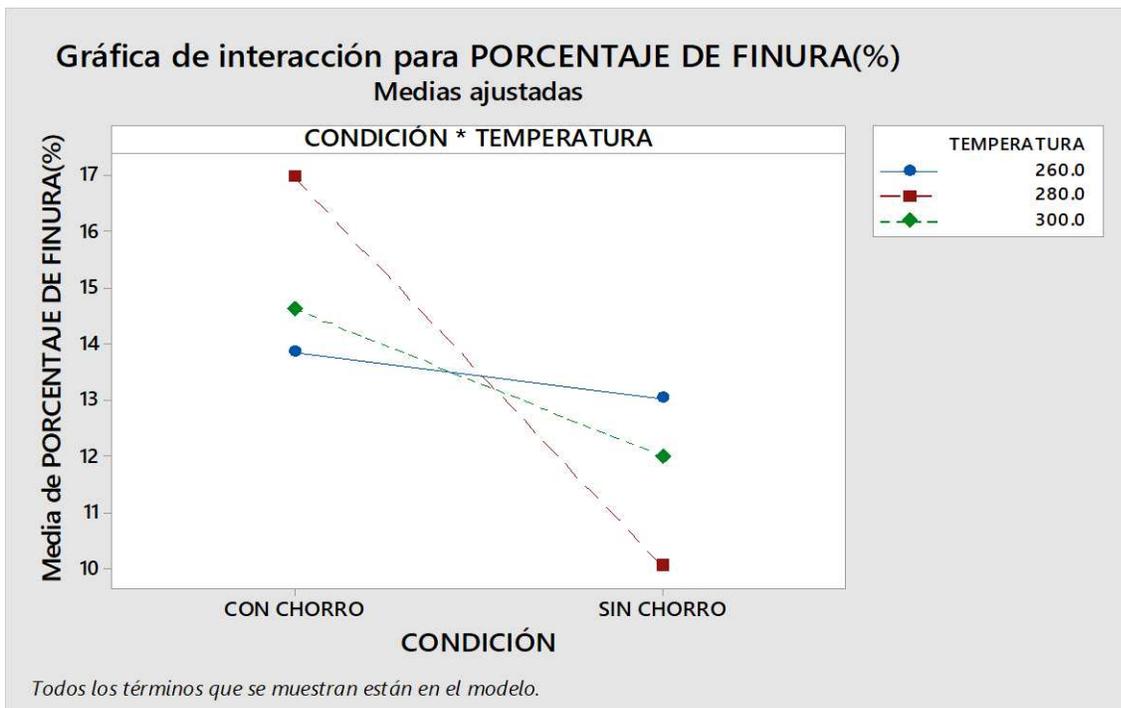
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 158 Grafica de efectos principales para porcentaje de finura.**



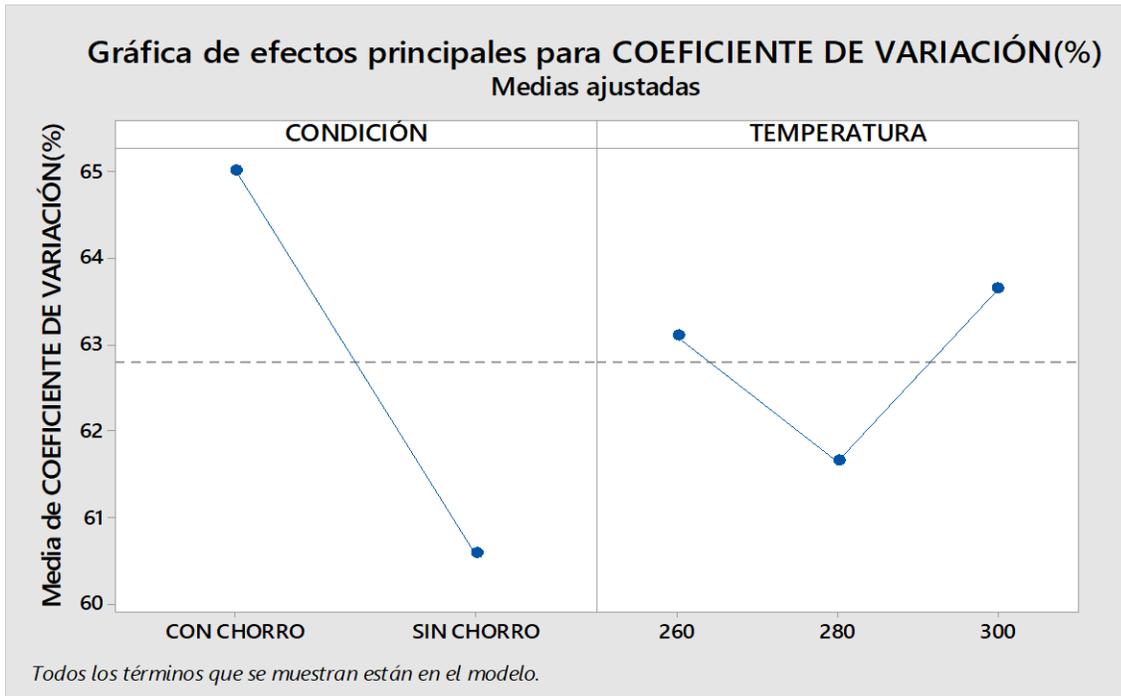
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 159 Grafica de interacción para porcentaje de finura.**



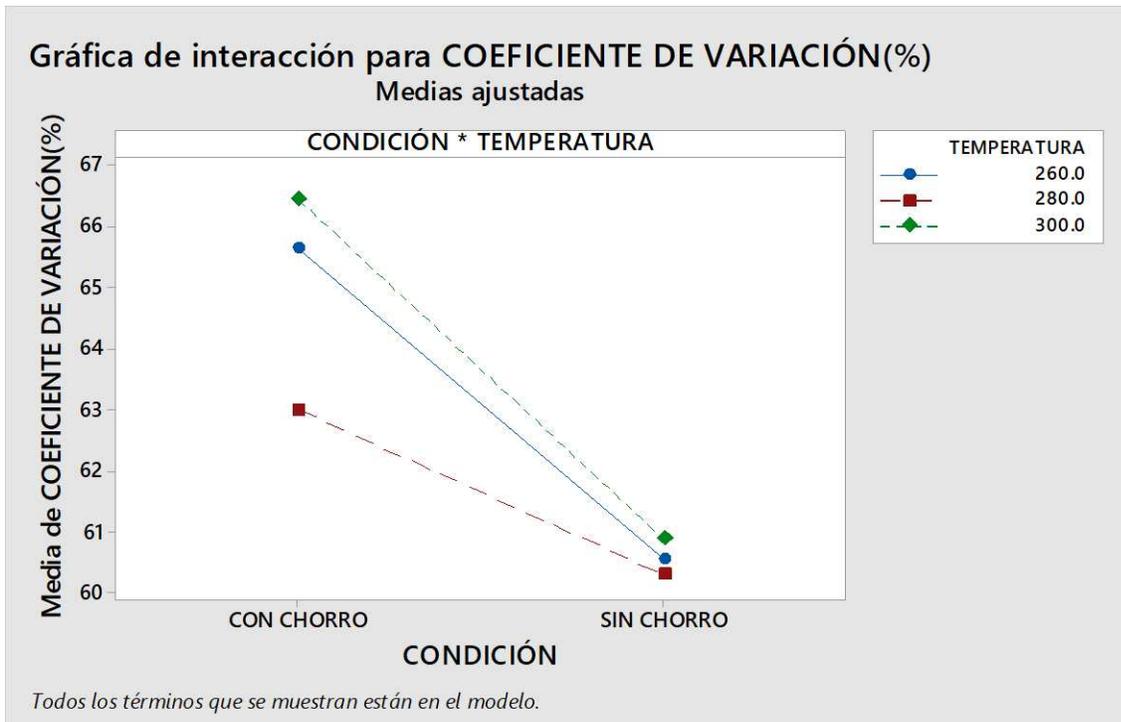
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 160 Grafica de efectos principales para el coeficiente de variación.**



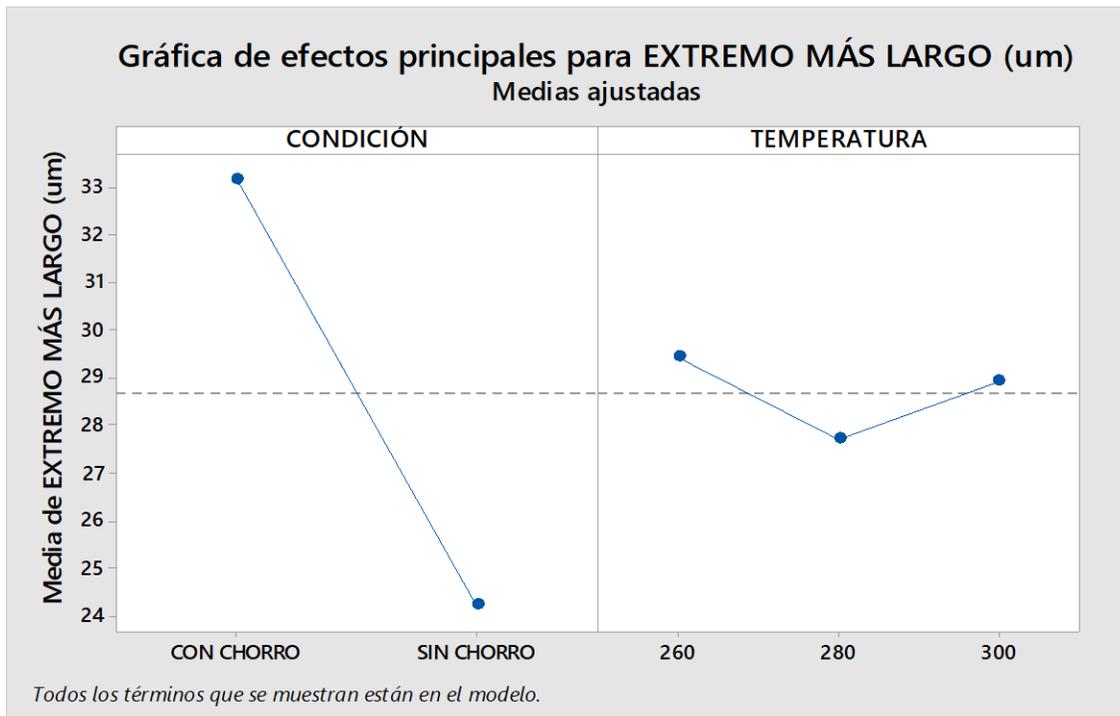
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 161 Grafica de interacción para coeficiente de variación.**



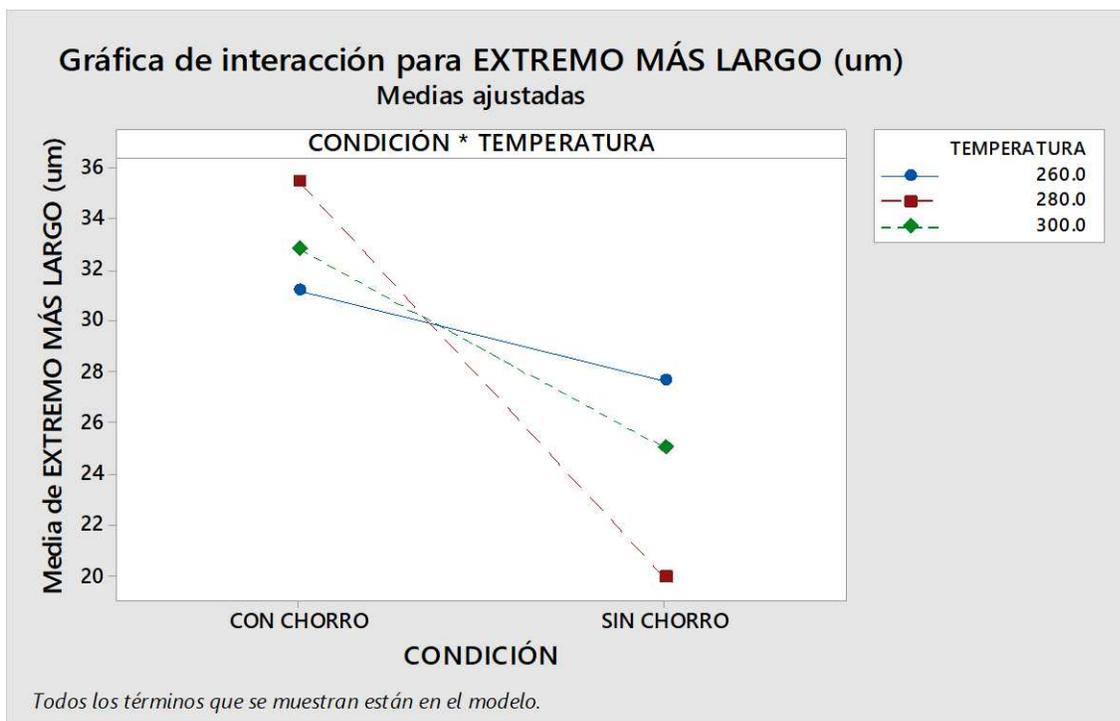
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 162 Grafica de efectos principales para extremo más largo.**



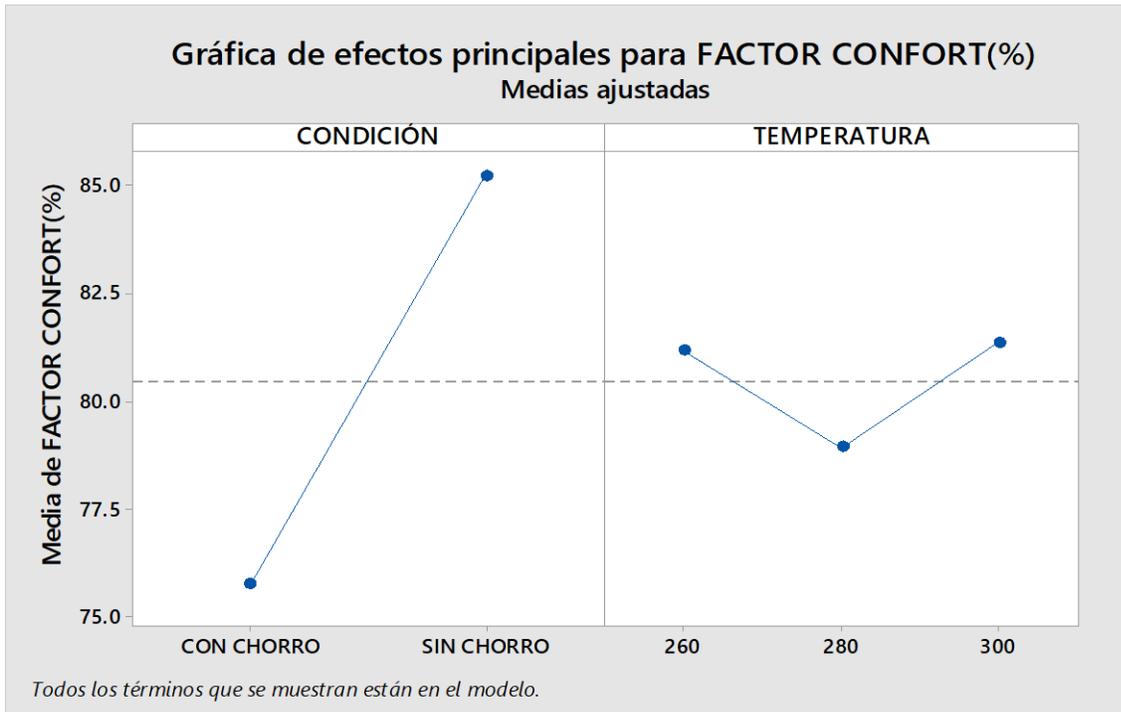
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 163 Grafica de interacción para extremo más largo.**



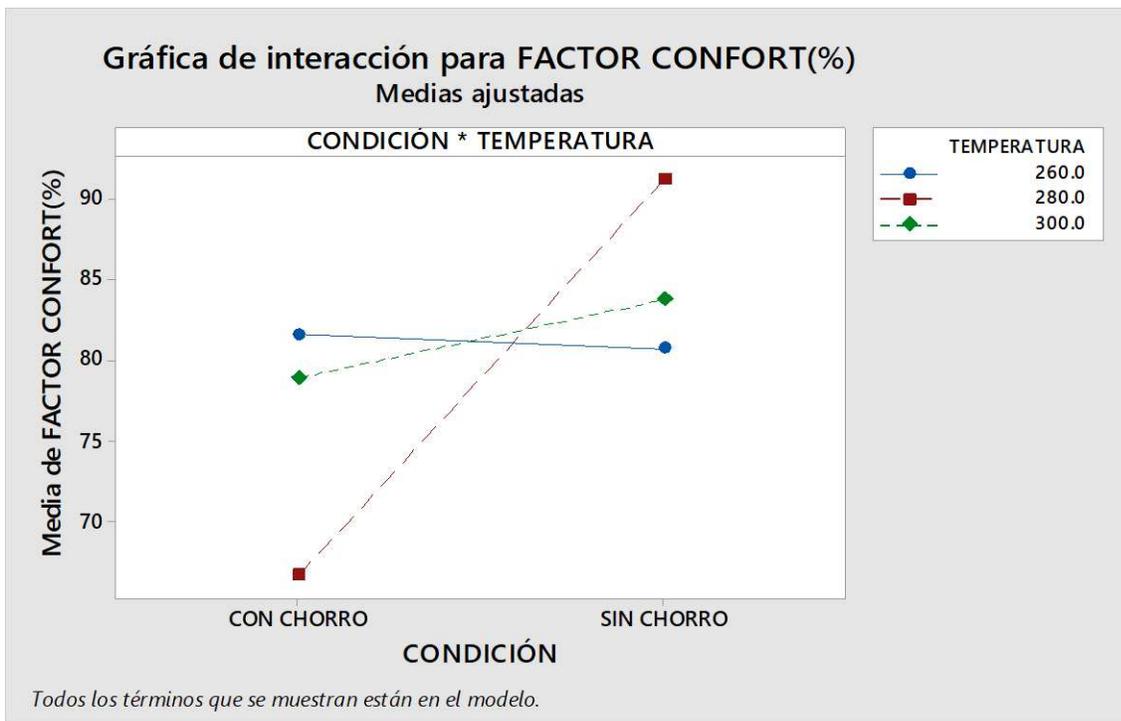
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 164 Grafica de efectos principales para factor confort.**



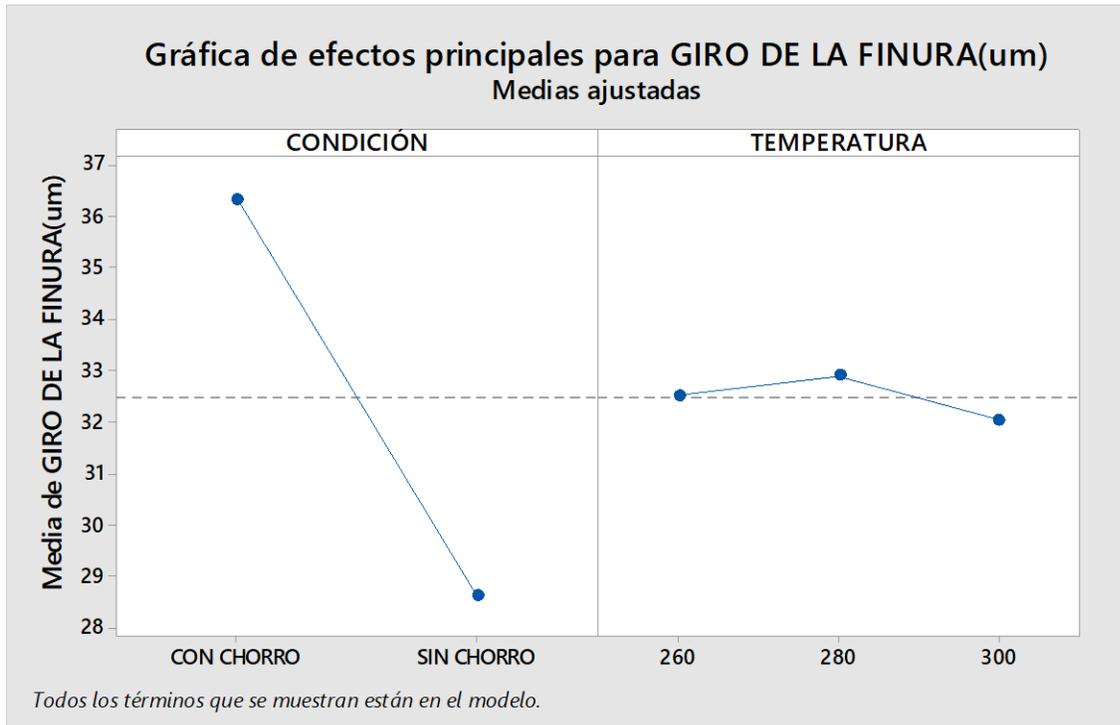
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 165 Grafica de interacción para factor confort.**



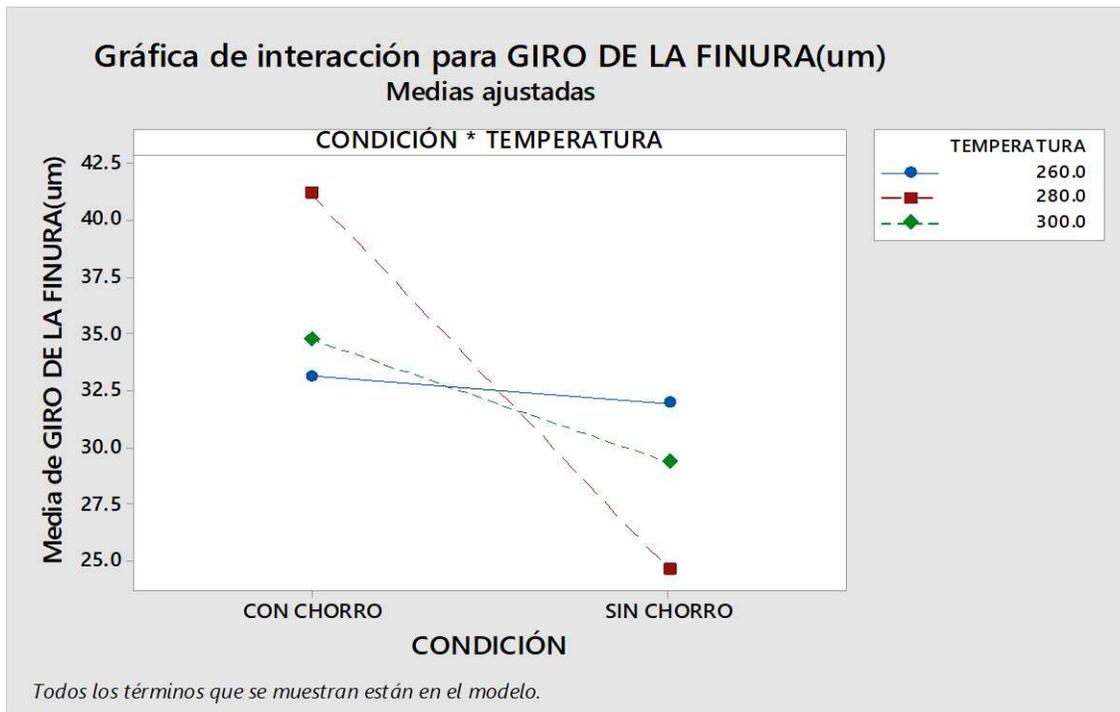
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 166 Grafica de efectos principales para giro de la finura.**



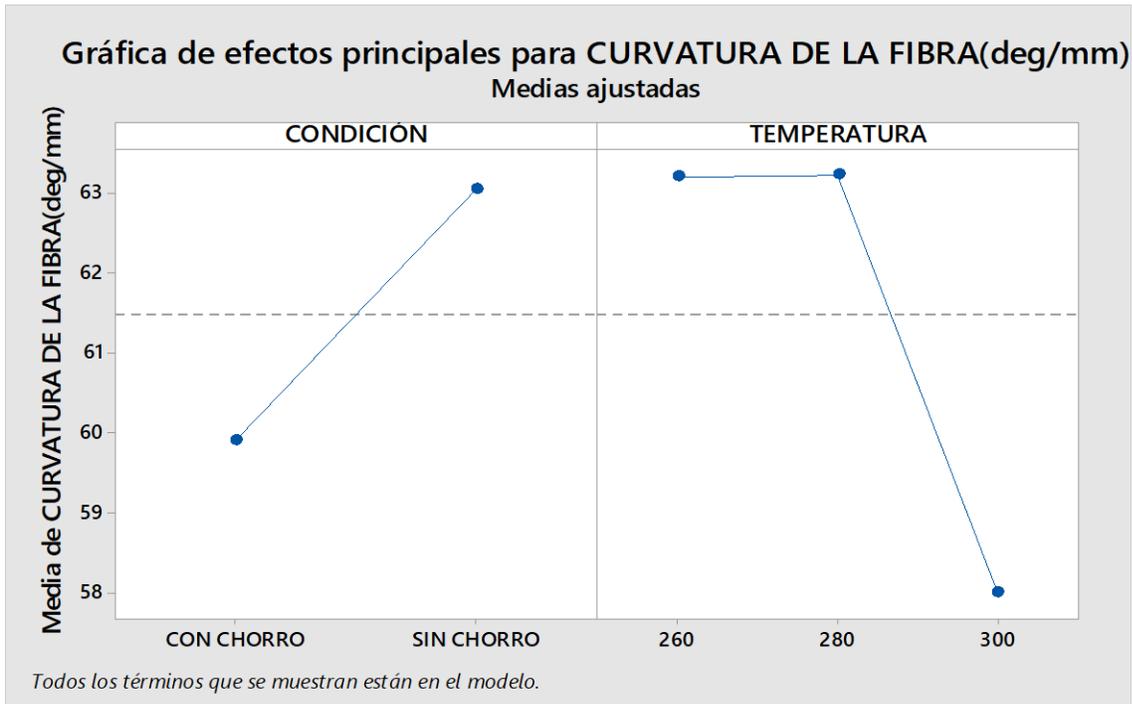
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 167 Grafica de interacción para giro de la finura.**



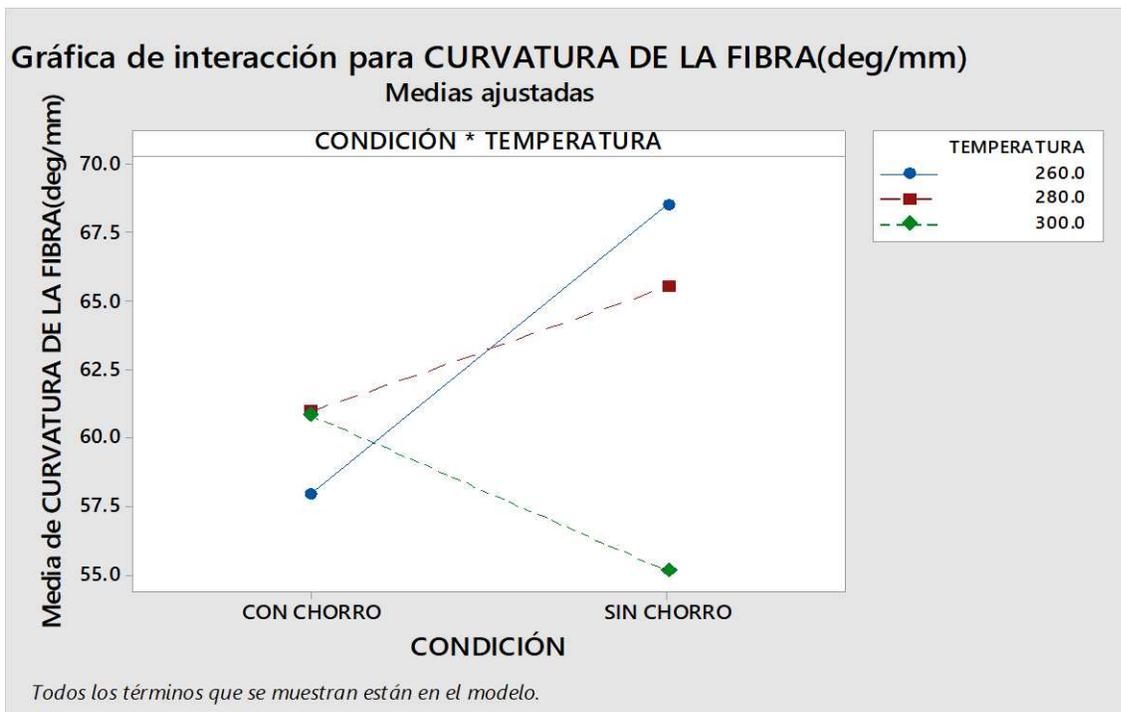
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 168 Grafica de efectos principales para curvatura de la fibra.**



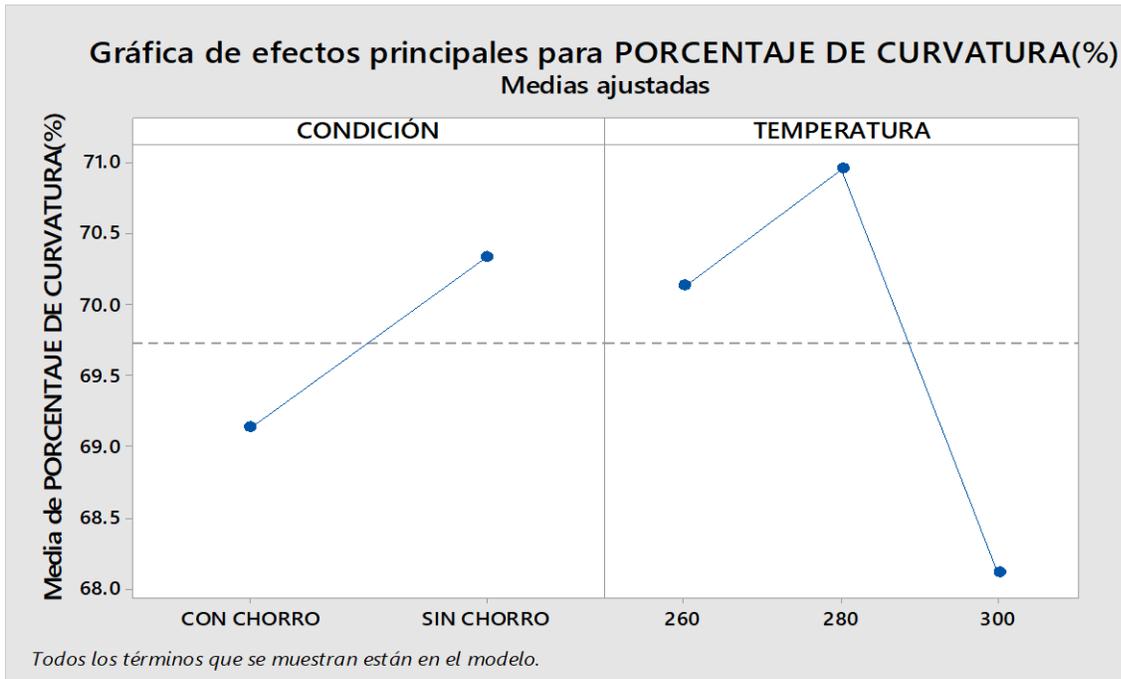
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 169 Grafica de interacción para curvatura de la fibra.**



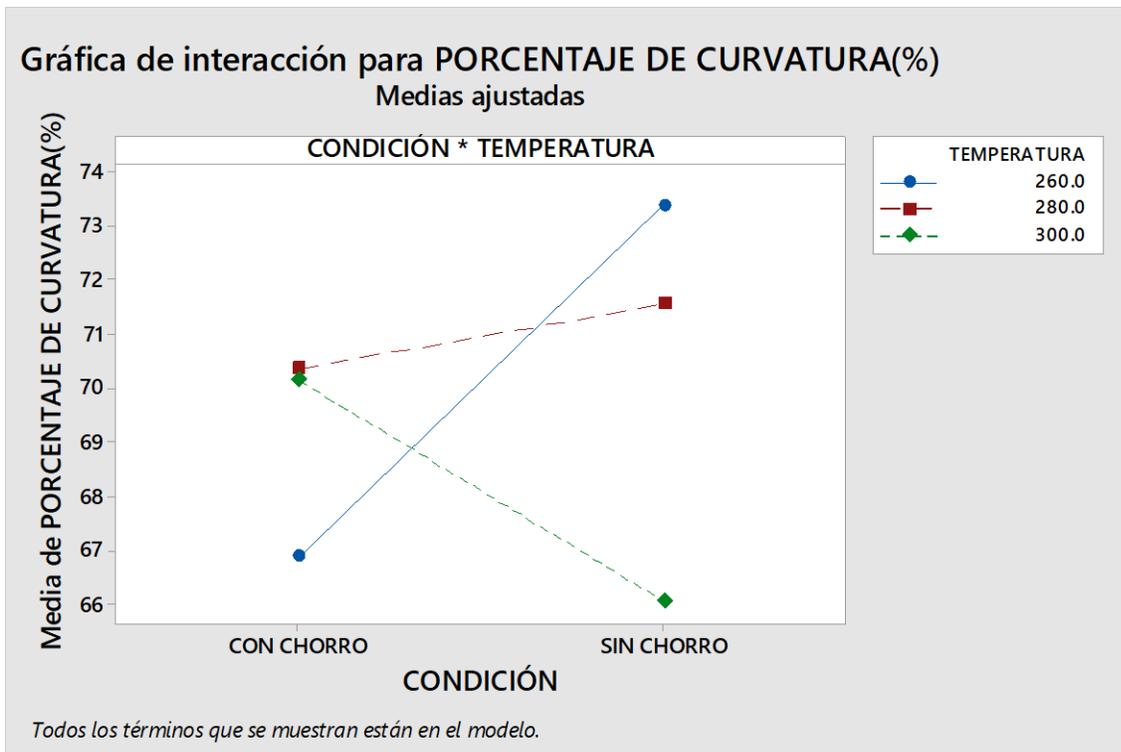
Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 170** Grafica de efectos principales para porcentaje de curvatura.



Fuente: Elaboración propia.

**Imagen 171** Grafica de interacción para porcentaje de curvatura.



Fuente: Elaboración propia.

## 8.8. ANEXO 8 ENSAYO DE TRACCIÓN

Se realizó el ensayo de tracción para polímeros según la norma ISO 527 ensayo de tracción plástico (ISO 527-1, 2012), A continuación, se detalla el procedimiento:

### Corte de las muestras

Se cortaron los paneles en probetas estándar, asegurando que las muestras tuvieran dimensiones uniformes y los bordes estuvieran lisos para evitar concentraciones de tensión, como se ve en la Imagen 172.

**Imagen 172 Corte de Muestras para ensayo de tracción.**



Fuente: Elaboración propia.

Las muestras ensayadas se midieron utilizando un micrómetro y un vernier, de acuerdo con las especificaciones de la norma del ensayo, como se muestra en la Imagen 173.

**Imagen 173 Medición de muestras para ensayo de tracción.**



Fuente: Elaboración propia.

**Colocación de la Muestra.**

La muestra fue colocada en la máquina de ensayo, asegurándose de que estuviera centrada y alineada correctamente como se ve en la Imagen 174.

**Imagen 174 Colocación de la muestra ensayo de tracción.**

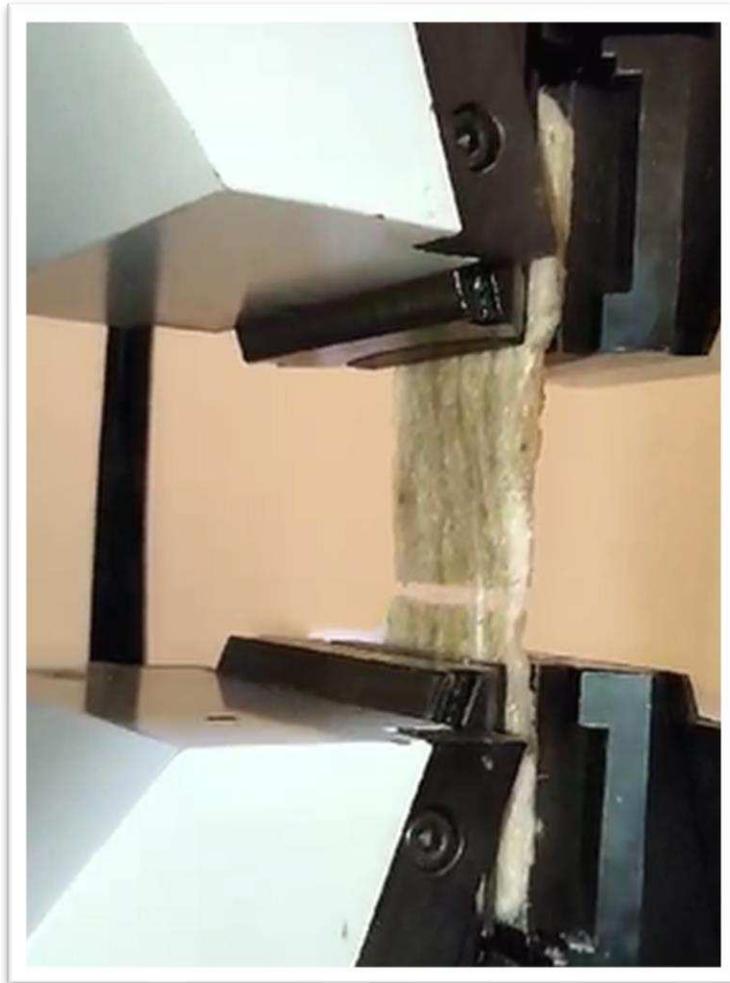


Fuente: Elaboración propia.

### Aplicación de la Carga

La carga se aplicó de manera controlada, aumentando la fuerza a una velocidad constante de deformación de  $5 \frac{mm}{min}$  hasta la rotura, como se observa en la Imagen 175.

Imagen 175 Ensayo de tracción.

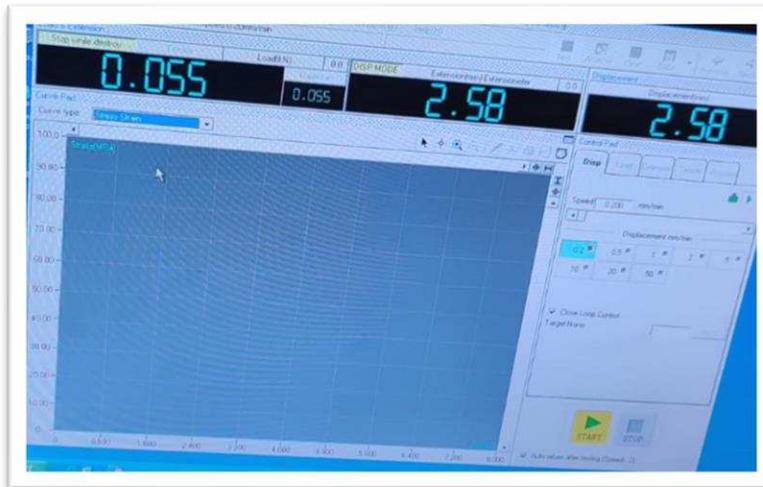


Fuente: Elaboración propia.

### Registro de Datos

Durante el ensayo, se registraron la fuerza aplicada y la deformación utilizando el equipo de tracción, tal como se muestra en la Imagen 176.

**Imagen 176 Registro de datos Ensayo de tracción.**



Fuente: Elaboración propia.

## **Experimentación**

Para la experimentación se tomaron cinco muestras. Las primeras dos muestras no pudieron ser ensayadas porque se rompían antes del ensayo al colocarlas en el equipo de tracción, como se ve en la Imagen 177.

**Imagen 177 Rotura de probetas antes del ensayo.**



Fuente: Elaboración propia.

## Materiales y Procedimientos

Se realizaron cinco muestras denominadas F1, F2, F3, F4 y F5, empleando fibras de PET recicladas (RPET) de tipo SC-280 con una masa de 60,0 g cada una. Las muestras F1, F2 y F3 se fabricaron mediante un proceso de filtrado en húmedo a partir de las fibras RPET. Durante la experimentación, se observaron las siguientes dificultades y resultados:

### Muestras F1 y F2

Las muestras F1 y F2 no pudieron ser analizadas utilizando el equipo de tracción universal debido a problemas de integridad estructural. Estas muestras no soportaron las fuerzas aplicadas durante la manipulación previa al ensayo, mostrando fracturas y deformaciones significativas antes de poder ser sometidas a la prueba de tracción. Este comportamiento puede atribuirse a una falta de homogeneidad en la distribución de las fibras y a una falta de cohesión interna en el material filtrado en húmedo.

### Muestra F3

La muestra F3 fue sometida a un ensayo de tracción y los resultados mostraron una gran variabilidad. Durante la prueba, se observaron valores de tensión y deformación fluctuantes, lo que indica una distribución no uniforme de las fibras y posibles defectos internos en el material. Los datos obtenidos del ensayo se reflejan en la Tabla 91.

**Tabla 91 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F3.**

PROPIEDAD	VALOR
Área de Sección Transversal ( $S_o$ )	652,740 mm <sup>2</sup>
Longitud Original ( $L_o$ )	70,420 mm
Fuerza Máxima ( $F_m$ )	1,230 kN
Tensión Máxima ( $R_m$ )	1,880 MPa
Elongación Máxima	70,00%
Módulo de Elasticidad ( $E$ )	25 MPa

Fuente: Elaboración propia

El gráfico de tensión-deformación mostró picos y valles, reflejando una estructura no homogénea como se aprecia en la Imagen 178. Esto sugiere que la muestra tiene áreas con diferentes resistencias, lo que causa una respuesta inconsistente bajo carga. La muestra F3 presentó baja resistencia a la tracción pero alta ductilidad, con un comportamiento mecánico muy variable.

### **Zona Elástica Inicial (0 - 49% de Deformación)**

En la zona elástica inicial, que abarca desde 0% hasta aproximadamente 49% de deformación, la curva de tensión-deformación de la muestra F3 muestra una pendiente suave. Esto indica un comportamiento elástico del material, con un módulo de elasticidad (E) de 25 MPa, reflejando una baja rigidez del material. La alta ductilidad es esencial para aplicaciones que requieren grandes deformaciones antes de la falla, y se debe a la estructura de las fibras RPET sin resina que proporcionan flexibilidad.

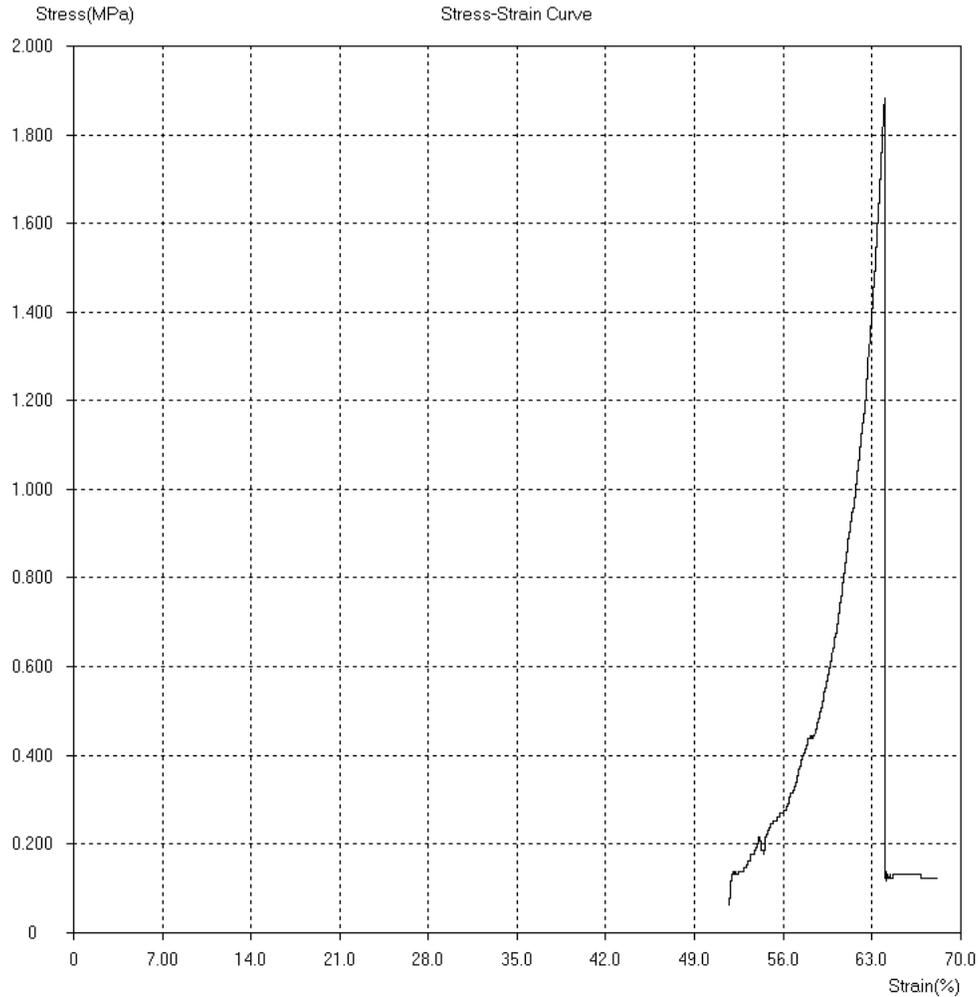
### **Primera Inflexión en la Curva (49% - 56% de Deformación)**

Entre 49% y 63% de deformación, se observan varias inflexiones en la curva, alcanzando una tensión máxima de 1,80 MPa. Estas inflexiones indican el inicio de la microplasticidad y la progresiva falla del material. La alta elongación máxima de 70,00% muestra que el material se deforma significativamente antes de romperse, debido a la estructura flexible de las fibras RPET.

### **Zona de Cuello y Ruptura (63% - 70% de Deformación)**

Después de alcanzar la tensión máxima en aproximadamente 63% de deformación, la curva desciende bruscamente, indicando una pérdida rápida de resistencia y la fractura del material. Esta caída abrupta se debe a la formación de grietas o fisuras críticas que llevan a la ruptura completa del material. La elongación máxima de 70% muestra que el material tiene una capacidad alta de deformación antes de fracturarse, aunque con baja resistencia. Este comportamiento subraya la falta de rigidez y la alta ductilidad del material compuesto únicamente de fibras de RPET reciclado, sin el refuerzo adicional de la resina poliéster.

**Imagen 178 Gráfico tensión-deformación muestra F3.**



Fuente: Elaboración propia.

### **Mejora con Resina Poliéster en Muestras F4 y F5**

Para mejorar la homogeneidad y la resistencia de las muestras, se decidió aplicar una capa de resina poliéster de 10 ml a las fibras RPET. Esta modificación se implementó en las muestras F4 y F5, recubriendo de forma uniforme con la resina para proporcionar una mejor cohesión interna y distribución de tensiones.

#### **Muestras F4**

La muestra F4 tratada con una capa de resina poliéster, mostró resultados de tracción significativamente más consistentes y fiables como se observa en la **Tabla 92**.

**Tabla 92 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F4.**

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
<b>Área de Sección Transversal (So)</b>	334,990 mm <sup>2</sup>
<b>Longitud Original (Lo)</b>	69,600 mm
<b>Fuerza Máxima (Fm)</b>	1,485 kN
<b>Tensión Máxima (Rm)</b>	4,430 MPa
<b>Elongación Máxima</b>	2,40%
<b>Módulo de Elasticidad (E)</b>	250 MPa

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados sugieren que el material, tratado con resina poliéster, es adecuado para aplicaciones que requieren rigidez y moderada ductilidad.

Analizando el gráfico de tensión-deformación para la muestra F4 como se aprecia en la Imagen 179, donde podemos observar los siguientes parámetros.

#### **Zona Elástica Inicial (0 – 1,20% de Deformación)**

En la zona elástica inicial, que abarca desde 0% hasta aproximadamente 1,20% de deformación, la curva de tensión-deformación de la muestra F4 muestra una pendiente pronunciada. Esto indica un comportamiento elástico del material, con un módulo de elasticidad (E) de 250 MPa, reflejando una rigidez considerable del material.

#### **Primera Inflexión en la Curva (1,20% - 1,40% de Deformación)**

Entre 1,20% y 1,40% de deformación, se observa un primer pico en la curva alrededor de 3,20 MPa de tensión. Este pico indica el inicio de la microplasticidad en el material, donde ciertas áreas comienzan a experimentar deformaciones plásticas localizadas. Este comportamiento puede deberse a la distribución no uniforme de la resina poliéster y a las interacciones iniciales entre las fibras de RPET y la resina. Las zonas con menor adherencia de resina o concentración irregular de fibras comienzan a deformarse plásticamente bajo la carga, lo que resulta en un comportamiento no homogéneo y la primera inflexión observable en la curva de tensión-deformación.

#### **Segunda Inflexión y Tensión Máxima (1,40% - 2,10% de Deformación)**

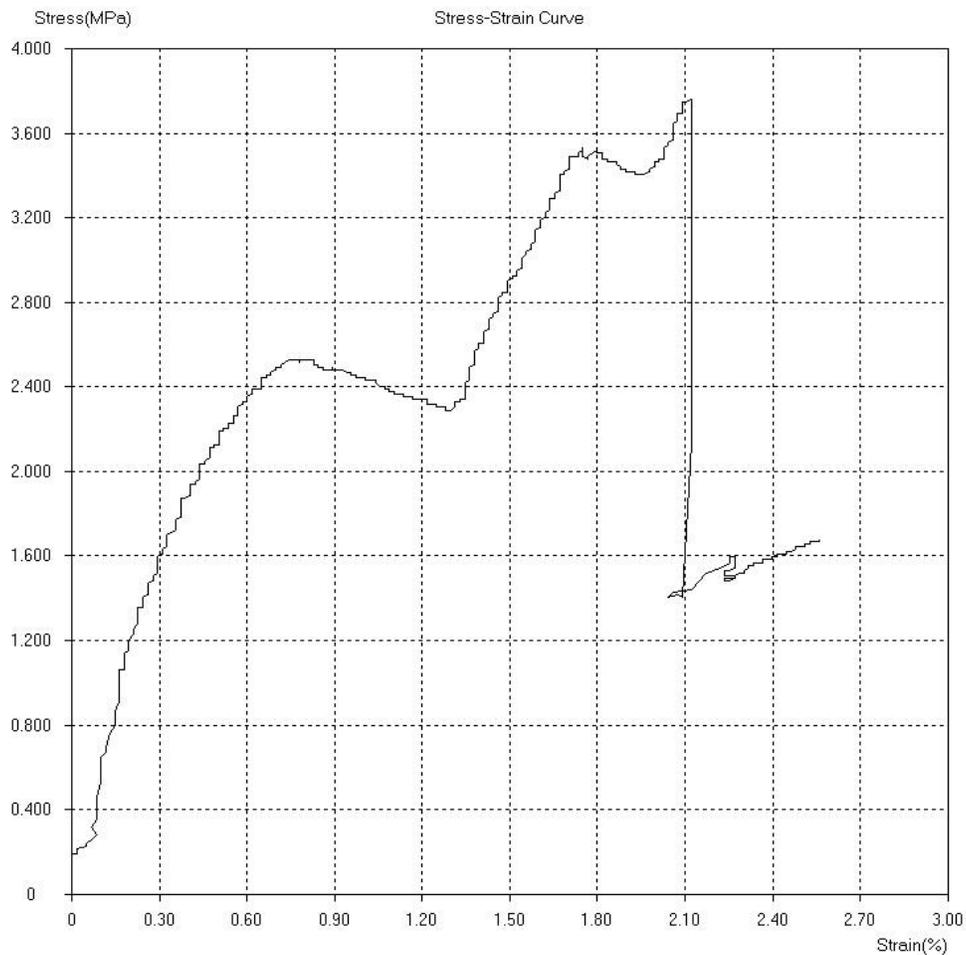
En la región de 1,40% a 2,10% de deformación, la curva muestra una segunda inflexión, alcanzando una tensión máxima de 4,43 MPa. Este comportamiento refleja la capacidad máxima de resistencia del material antes de la formación de grietas críticas. Las fluctuaciones en la tensión dentro de esta región pueden ser causadas por la estructura no homogénea del material, donde la

distribución de la resina poliéster no es completamente uniforme. Las interacciones complejas entre las fibras de RPET y la resina resultan en una redistribución de las tensiones, con algunas áreas soportando más carga que otras hasta alcanzar la resistencia máxima del material.

### **Zona de Cuello y Ruptura (2.10% - 2.40% de Deformación)**

Después de alcanzar la tensión máxima en aproximadamente 2.10% de deformación, la curva desciende bruscamente, indicando una pérdida rápida de resistencia y la fractura del material. Esta caída abrupta se debe a la formación de grietas o fisuras críticas que llevan a la ruptura completa del material. La elongación máxima de 2.40% muestra que el material tiene una capacidad moderada de deformación antes de fracturarse. En esta fase, tanto las fibras de RPET como la resina poliéster han alcanzado sus límites de deformación, resultando en la falla total del material bajo la carga aplicada. Este comportamiento subraya la importancia de la homogeneidad y la calidad de la distribución de la resina para mejorar la ductilidad y resistencia general del material compuesto.

**Imagen 179 Grafico tensión-deformación muestra F4.**



Fuente: Elaboración propia

### Muestras F5:

La muestra F5 mostró una mejora considerable en términos de consistencia y resistencia como se aprecia en la Tabla 93. El gráfico de tensión-deformación reveló una resistencia máxima a la tracción ( $R_m$ ) de aproximadamente 4,48 MPa y una elongación máxima del 5,40%.

**Tabla 93 Resultados obtenidos con el ensayo de tracción muestra F5.**

PROPIEDAD	VALOR
Área de Sección Transversal ( $S_o$ )	528,08 mm <sup>2</sup>
Longitud Original ( $L_o$ )	72,39 mm
Fuerza Máxima ( $F_m$ )	2,365 kN
Tensión Máxima ( $R_m$ )	4,50 MPa
Elongación Máxima	5,40%
Módulo de Elasticidad ( $E$ )	300 MPa

Fuente: Elaboración propia

La curva de esfuerzo-deformación para la muestra F5 (Imagen 180) mostró una pendiente inicial ligeramente menor que F4, indicando un módulo de elasticidad ( $E$ ) de aproximadamente 215,83 MPa, pero con una mayor ductilidad, lo que sugiere un buen equilibrio entre rigidez y capacidad de deformación.

#### **Zona Elástica Inicial (0 – 1,20% de Deformación)**

En la zona elástica inicial, que abarca desde 0% hasta aproximadamente 1,20% de deformación, la curva muestra una pendiente pronunciada. Esto indica que el material se deforma de manera proporcional a la tensión aplicada, retornando a su forma original una vez que la carga es retirada, reflejando un comportamiento elástico. La pendiente de esta parte de la curva corresponde al módulo de elasticidad ( $E$ ), el cual se ha determinado en 300 MPa para la muestra F5. Este alto valor de  $E$  indica que el material es bastante rígido, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren resistencia a deformaciones bajo cargas iniciales. La rigidez inherente de la fibra de RPET, combinada con la resina poliéster, proporciona una estructura que resiste deformaciones significativas hasta el punto de la microplasticidad.

### **Primera Inflexión en la Curva (1,20% - 1,80% de Deformación)**

Entre 1,20% y 1,80% de deformación, se observa un primer pico alrededor de los 2,5 MPa de tensión, indicando el inicio de la microplasticidad. Este comportamiento puede atribuirse a la distribución no uniforme de la resina poliéster y las interacciones iniciales entre las fibras de RPET y la resina. En este rango, las áreas del material con menor adherencia o concentración de resina comienzan a deformarse plásticamente, lo cual genera variaciones en la resistencia. La tensión localizada puede superar la resistencia de estas áreas menos reforzadas, resultando en la primera inflexión observable en la curva de tensión-deformación.

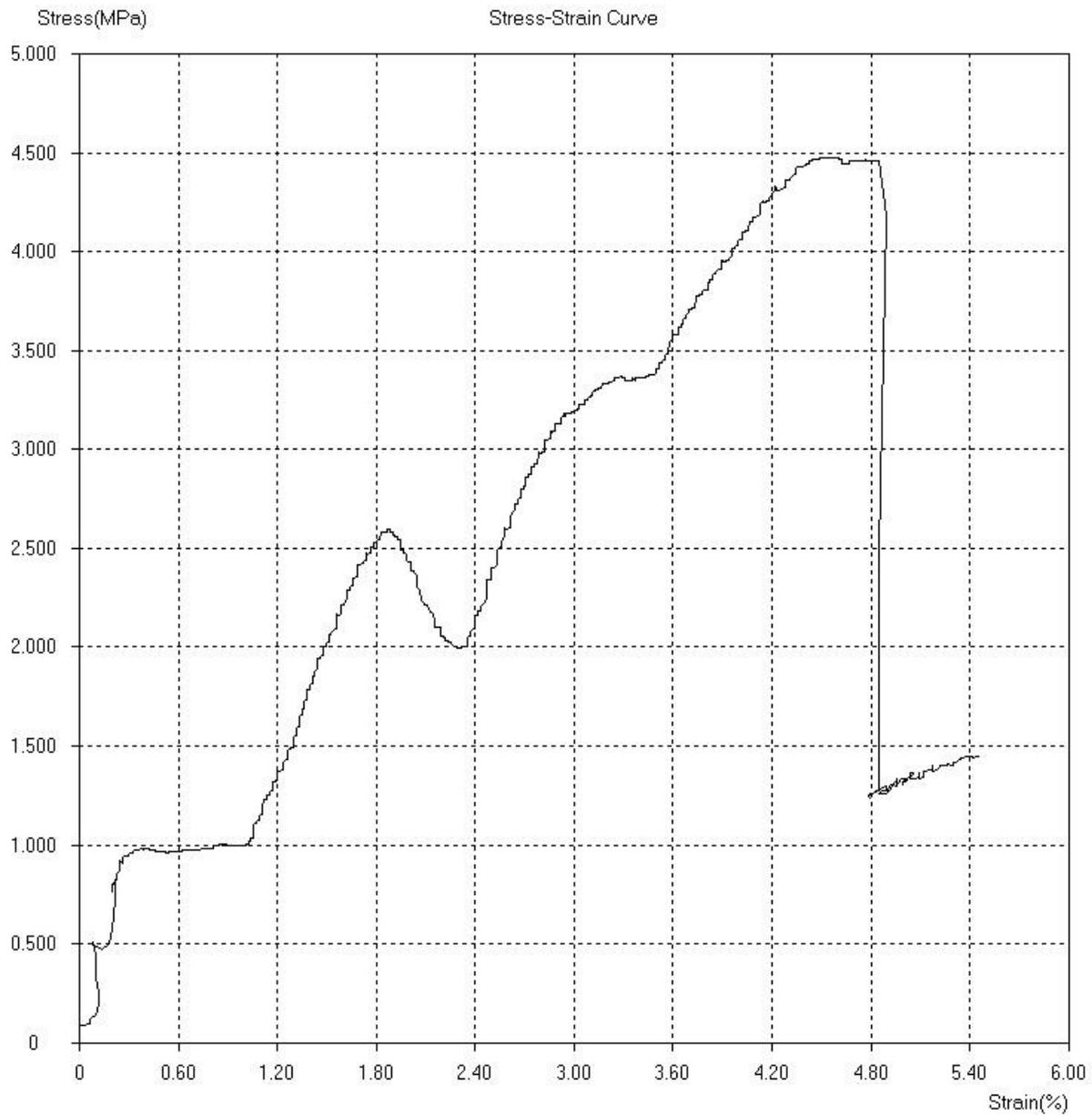
### **Segunda Inflexión y Tensión Máxima (1,80% - 4,80% de Deformación)**

La región de 1,80% a 4,80% de deformación se caracteriza por una serie de incrementos y descensos en la tensión, alcanzando una tensión máxima de 4,50 MPa. Esta zona refleja la capacidad máxima de resistencia del material antes de que se formen grietas críticas. Las fluctuaciones en la tensión pueden ser causadas por la estructura no homogénea del material, donde la distribución de la resina poliéster no es completamente uniforme. Las complejas interacciones entre las fibras de RPET y la resina resultan en una redistribución de las tensiones a medida que algunas áreas ceden y otras soportan mayor carga, culminando en la tensión máxima del material.

### **Zona de Cuello y Ruptura (4,80% - 5,40% de Deformación)**

Después de alcanzar la tensión máxima en aproximadamente 4,80% de deformación, la curva desciende bruscamente, lo que indica una pérdida rápida de resistencia y la fractura del material. Esta caída abrupta se debe a la formación de grietas o fisuras críticas dentro de la estructura del material, que llevan a su ruptura completa. La elongación máxima registrada, de 5,40%, muestra que el material tiene una capacidad moderada de deformación antes de fracturarse. En esta fase, tanto las fibras de RPET como la resina poliéster han alcanzado sus límites de deformación, resultando en la falla total del material bajo la carga aplicada. Este comportamiento resalta la importancia de la homogeneidad y calidad de la distribución de la resina para mejorar la ductilidad y resistencia general del material compuesto.

**Imagen 180 Gráfico tensión-deformación muestra F5.**



Fuente: Elaboración propia

Para un análisis comparativo entre las muestras ensayadas podemos tomar los parámetros obtenidos en los ensayos de tracción como se observa en la Tabla 94.

**Tabla 94 Análisis comparativo ensayo de tracción.**

PROPIEDAD	F3	F4	F5	ANÁLISIS COMPARATIVO
<b>Fuerza Máxima (Fm)</b>	1,230 kN	1,485 kN	2,365 kN	F4 y F5 soportan mayores cargas antes de fracturarse debido a la matriz de resina que refuerza las fibras de RPET, mejorando la distribución de las tensiones.
<b>Tensión Máxima (Rm)</b>	1,80 MPa	4,43 MPa	4,50 MPa	La tensión máxima es mayor en F4 y F5 porque la resina poliéster mejora la cohesión entre las fibras de RPET, proporcionando una estructura más resistente a la tracción.
<b>Elongación Máxima</b>	70,00%	2,40%	5,40%	F3 tiene alta ductilidad pero baja resistencia, con una elongación máxima del 70%. F4 y F5, con elongaciones menores, muestran mayor rigidez y menor capacidad de deformación antes de la fractura.
<b>Módulo de Elasticidad (E)</b>	25 MPa	250 MPa	300 MPa	F4 y F5 tienen módulos de elasticidad significativamente mayores, reflejando mayor rigidez debido a la presencia de resina, en comparación con el material más flexible y menos resistente de F3.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo de las muestras F3, F4 y F5 revela que la adición de resina poliéster en F4 y F5 mejora significativamente las propiedades mecánicas en comparación con F3, que está compuesta únicamente de fibras de RPET. La resina refuerza las fibras de RPET, resultando en mayores fuerzas y tensiones máximas, y en módulos de elasticidad más altos, aunque a costa de una menor elongación. Esto sugiere que los compuestos de RPET con resina poliéster son más adecuados para aplicaciones que requieren alta rigidez y resistencia, con una moderada capacidad de deformación antes de la fractura. Por ejemplo, en aplicaciones estructurales como paneles de construcción o componentes automotrices, donde la resistencia y rigidez son críticas, las muestras F4 y F5 serían ideales. En contraste, F3, con su mayor ductilidad pero menor resistencia, sería más adecuado para aplicaciones donde se necesita más flexibilidad y menos rigidez.

## 8.9. ANEXO 9 MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA RPET

En el desarrollo de nuevos materiales compuestos, la utilización de fibras recicladas de polietileno tereftalato (RPET) junto con diversas matrices poliméricas, como resina poliéster y poliuretano, permite la creación de productos con propiedades específicas que satisfacen diversas aplicaciones industriales. Este anexo presenta un resumen de diferentes formulaciones de materiales compuestos, detallando las proporciones de fibras RPET y matrices, así como las propiedades esperadas de cada material. Estas formulaciones fueron desarrolladas para evaluar cómo las diferentes combinaciones de fibra y matriz afectan las propiedades mecánicas.

**Tabla 95 Materiales compuestos con fibra RPET.**

<b>RESINA POLIÉSTER-FIBRA RPET FILTRADO</b>				
<b>CÓDIGO</b>	<b>FORMULACIÓN</b>	<b>TIPO DE MATRIZ</b>	<b>PROCESO</b>	<b>PROPIEDADES PRINCIPALES</b>
<b>A-1</b>	60 g RPET(60%) 40 g Resina poliéster(40%)	Resina Poliéster	Filtrado en húmedo	Alta rigidez, buena resistencia a la tracción, adecuada durabilidad.
<b>RESINA POLIÉSTER-FIBRA RPET</b>				
<b>B- 2</b>	15 g RPET(10%) 135 g Resina poliéster(90%)	Resina Poliéster	Colocación en capas	Baja rigidez, flexibilidad moderada, buena durabilidad.
<b>B- 3</b>	30 g RPET(20%) 120 g Resina poliéster(80%)	Resina Poliéster	Colocación en capas	Moderada rigidez, buena resistencia a la tracción, buena durabilidad.
<b>B- 4</b>	45 g RPET(27,27%) 120 g Resina poliéster(72,72%)	Resina Poliéster	Colocación en capas	Alta rigidez, buena resistencia a la tracción, buena durabilidad.
<b>POLIURETANO FLEXIBLE -FIBRA RPET</b>				
<b>C-5</b>	10 g RPET(14,28%) 60 g Poliuretano flexible (85,72%)	Poliuretano flexible	Colocación en capas	Alta flexibilidad, baja rigidez, buena amortiguación.
<b>C-6</b>	15 g RPET(20%) 60 g Poliuretano flexible (80%)	Poliuretano flexible	Colocación en capas	Moderada flexibilidad, moderada rigidez, buena amortiguación.
<b>C-7</b>	30 g RPET(33,33%) 60 g Poliuretano flexible (66,67%)	Poliuretano flexible	Colocación en capas	Moderada flexibilidad, moderada rigidez, buena amortiguación.
<b>POLIURETANO RÍGIDO -FIBRA RPET</b>				
<b>D-8</b>	15 g RPET(25%) 45 g Poliuretano rígido (75%)	Poliuretano Rígido	Colocación en capas	Alta rigidez, buena resistencia a la compresión, alta durabilidad.
<b>D-9</b>	30 g RPET(50%) 30 g Poliuretano rígido (50%)	Poliuretano Rígido	Colocación en capas	Muy alta rigidez, excelente resistencia a la compresión, alta durabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 95 se proporciona una visión clara de las diferentes combinaciones de materiales utilizados y las propiedades resultantes, facilitando la evaluación y selección del material compuesto más adecuado.

### **Resina Poliéster-Fibra RPET**

A-1: La formulación con 60% de RPET y 40% de resina poliéster(Imagen 181), utilizando el proceso de filtrado en húmedo, muestra una alta rigidez y buena resistencia a la tracción, siendo adecuada para aplicaciones que requieren materiales estructurales robustos.

**Imagen 181 Resina Poliéster-Fibra RPET filtrada.**



Fuente: Elaboración Propia.

B-2, B-3, B-4(Imagen 182): A medida que aumenta la proporción de RPET en la matriz de resina poliéster, la rigidez y la resistencia a la tracción también aumentan. La colocación en capas permite una distribución uniforme de las fibras, mejorando las propiedades mecánicas. La formulación B-4 con 27,27% de RPET muestra una rigidez considerablemente alta, adecuada para aplicaciones estructurales.

**Imagen 182 Resina Poliéster-Fibra RPET por capas.**



Fuente: Elaboración Propia.

### **Poliuretano Flexible - Fibra RPET**

C-5, C-6, C-7(Imagen 183): Las formulaciones con poliuretano flexible muestran alta flexibilidad y buena amortiguación. La incorporación de RPET hasta un 50% mantiene la flexibilidad moderada y mejora la rigidez comparada con las formulaciones con menor contenido de fibra. Son ideales para aplicaciones que requieren materiales con buenas propiedades de amortiguación y cierta rigidez, como en la fabricación de cojines y sellos.

**Imagen 183 Poliuretano Flexible - Fibra RPET**



Fuente: Elaboración Propia.

### **Poliuretano Rígido - Fibra RPET**

D-8, D-9(Imagen 184): Las formulaciones con poliuretano rígido y diferentes porcentajes de RPET muestran alta rigidez y excelente resistencia a la compresión. La inclusión del 50% de RPET (D-9) resulta en una formulación extremadamente rígida y duradera, adecuada para aplicaciones estructurales y de aislamiento.

**Imagen 184 Poliuretano Rígido - Fibra RPET**



Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, no siempre se logra una adecuada adherencia entre la matriz polimérica de poliuretano rígido y las fibras RPET debido a incompatibilidad química, superficies hidrofóbicas de las fibras RPET y condiciones de curado no óptimas, incluso con la distribución por capas.



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2399/2024  
La Paz, 31 de julio de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **24 de julio de 2024**, por **PABLO ANDRES GUMIEL RIVERA** con C.I. N° **8323974 LP**, con número de trámite **DA 1371/2024**, señala la pretensión de inscripción de la Tesis de Post-grado titulada: **"ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CONFORMADO EN LAS PROPIEDADES DE LA FIBRA DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO (RPET) DURANTE EL PROCESO DE HILADO CENTRÍFUGO FUNDIDO"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Tesis de Post-grado titulada: "**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE CONFORMADO EN LAS PROPIEDADES DE LA FIBRA DE TEREFALATO DE POLIETILENO RECICLADO (RPET) DURANTE EL PROCESO DE HILADO CENTRÍFUGO FUNDIDO**" a favor del autor y titular: **PABLO ANDRES GUMIEL RIVERA** con **C.I. Nº 8323974 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/lm

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



SJQp5Xx40q63G

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, Nº 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
Nº 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, Nº 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, Nº 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, Nº 366  
casi esq. Urriolagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Callees Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, Nº 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, Nº 5837,  
entre Ayacucho  
y Junin, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas Nº 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160



**Registro****Nombre De autor: Ing Pablo Andres Gumiel Rivera****Correo electrónico :14gumielpablinas@gmail.com****Numero Celular: 69904899**